

UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
ODSEK ZA ELEKTROTEHNIKU I RAČUNARSTVO
MAGISTARSKA STUDIJE
SMER: ELEKTROENERGETIKA

SAVREMENE ELEKTRIČNE MAŠINE ZA PRIMENU U HIBRIDNIM I ELEKTRIČNIM VOZILIMA

ISPITNI RAD IZ PREDMETA:
SPECIJALNE ELEKTRIČNE MAŠINE

Mentor:

dr Radiša Jevremović, dipl. ing.

Kandidat:

Dejan Raca, dipl. ing.

Novi Sad
mart/juni 2001.

Iako je neuobičajeno za ovakve radove, osećam obavezu da izrazim zahvalnost ljudima koji su mi izuzetno pomogli da istražim ovu oblast i napišem ovaj rad. Pre svega dugujem zahvalnost gospodinu Robertu Mastromattei-u (Applimotion Inc. i motorcontrol.com) koji mi je svojim savetima u vezi sa prikupljanjem literature i svojim mišljenjem u vezi sa različitim problemima u ovoj oblasti pomogao da napravim prve korake u svom istraživanju. Veoma sam zahvalan prof. Jaceku Gierasu na brojnim savetima i spremnosti da mi obezbedi dodatnu literaturu (koja se na žalost izgubila u nekoj od poštanskih organizacija). Na kraju se zahvaljujem i svo kolegi Vladimiru Krnajskom koji je uporno i pažljivo iščitavao sve verzije rada u nekoliko faza njegovog nastanka. Nadam se da je tekst ovog rada dostojan angažovanja svih ovih ljudi.

Although unusual for this kind of text, I feel an obligation to acknowledge the people whose help was crucial for my research and writing. First of all, I have to thank Mr. Robert Mastromattei (Applimotion Inc. and motorcontrol.com) for his advises on how to search for literature and on his opinions on different problems in this area. He inspired my interest for this field and helped me make my first steps as an independent researcher. I am very grateful to Prof. Jacek Gieras for his numerous advises and for providing additional literature (which apparently got lost somewhere in Post Services). Last but not the least, I am thankful to my colleague Vladimir Krnajski who carefully proofread all versions of this text. I hope that the text I have written will justify the efforts and the commitment of all this people.

SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
1.1. Ekologija, ekonomičnost i infrastruktura – faktori razvoja EV	2
1.2. EV – vozila budućnosti ili sadašnjosti	3
2. Električna vozila	3
2.1. Tipovi električnih vozila	3
2.1.1. <i>Potpuno električna vozila (EV)</i>	3
2.1.2. <i>Hibridna električna vozila (HEV)</i>	4
2.2. Izvori električne energije.....	5
2.2.1. <i>Savremeni akumulatori i autonomija električnih vozila</i>	5
2.2.2. <i>Punjenje akumulatora</i>	6
2.2.3. <i>Solarne ćelije, gorivne ćelije i reformeri</i>	6
2.2.4. <i>Savremeni toplotni motori</i>	6
2.3. Konstrukcija EV i HEV	7
2.3.1. <i>Specifičnosti konstrukcije EV</i>	7
2.3.2. <i>Prenos snage sa motora na točkove</i>	8
2.3.3. <i>Moguće konfiguracije pogonskih sistema</i>	9
3. Potrebne karakteristike električnih mašina za EV i HEV.....	9
3.1. Vučni motori	10
3.1.1. <i>Adhezija i otpori vuče – momentna karakteristika vučnog motora</i>	10
3.1.2. <i>Rekuperativno kočenje</i>	13
3.1.3. <i>Specifična snaga, cena i stepen korisnog dejstva</i>	14
3.1.4. <i>Kontrolabilnost</i>	15
3.1.5. <i>Robusnost</i>	15
3.2. Generatori i pomoćni motori	16
3.2.1. <i>Generatori za HEV</i>	16
3.2.2. <i>Pomoćni motori</i>	17

4. Vučni motori	17
4.1. Asinhroni motori	18
4.1.1. Broj faza asinhronog motora.....	24
4.1.2. Asinhroni motor sa rotirajućim satorom (<i>Anti-Directional-Twin-Rotary-Motor</i>) - ADTR i dvostruko napajani Brushless motor.....	26
4.2. Motori sa stalnim magnetom (PM – Permanent Magnet)	28
4.2.1. Sinhroni PM motor	32
4.2.2. Brushless DC motor	34
4.3. Reluktantni motori.....	36
4.3.1. Sinhroni reluktantni motor (SyRM)	38
4.3.2. Impulsni reluktantni motor (SRM).....	42
4.4. Hibridni motori.....	47
4.4.1. Motori sa PM i reluktantnom komponentom momenta	48
4.4.2. Vernijeov sinhroni motor sa površinski montiranim PM	50
4.4.3. Hibridni motor sa PM i pomoćnom pobudom.....	51
4.4.4. Histerezisni hibridni motor sa PM	52
4.5. Geometrija savremenih motora	53
4.5.1. Motori u točku – “klasične” konstrukcije	53
4.5.2. Motori sa transverzalnim i aksijalnim fluksom	56
5. Generatori za HEV	61
5.1. Ultrabrzi generatori	62
5.2. Generatori sa rotorom u obliku diska	64
6. Izbor tipa vučnog pogona EV/HEV	66
6.1. Usporedna analiza različitih tipova vučnih motora	67
7. Eksploatacija, održavanje i pouzdanost EV/HEV	71
8. Zaključak.....	73
9. Literatura	75

1. UVOD

O električnim vozilima (EV) se obično razmišlja kao o nečemu veoma savremenom ili čak kao o nečemu što pripada budućnosti. Takav stav ima svog osnova mada je istina sasvim drugačija. EV su se pojavila uporedo ili čak pre vozila sa motorima sa unutrašnjim sagorevanjem (SUS). Kako se navodi u /1/ 1895. godine kada je automobilska industrija počela da se razvija, mnogi konstruktori su smatrali da će električni pogon biti usvojen za pokretanje drumskih vozila. Uzroke za takav stav treba tražiti u činjenici da je tehnologija korišćena u električnom tramvaju u to vreme bila dobro razvijena dok su se motori SUS tada tek počeli razvijati. U to vreme pogonski sistem EV sačinjavali su: olovni akumulatori i motor jednosmerne struje čija je brzina regulisana posredstvom otpornika /1/, /2/. Za ovakav pogon su karakteristični nedostaci u pogledu slabe efikasnosti, male autonomije kretanja i velike nepouzdanosti.

Razlozi zbog kojih je kao pogonski sistem za drumska vozila prevladao motor SUS svakako su i navedene slabosti primenjenog električnog pogonskog sistema, ali nisu jedini. Prema navodima iz /2/ i /3/ primat SUS motora nad električnim pogonom osiguran je oko 1915. godine. Tada su stepen i brzina razvoja SUS motora u odnosu na električni pogon bili takvi da su obezbeđivali zadovoljenje težnje ljudi za sve bržim, snažnijim i autonomnijim vozilima. Razvoj EV je bio suviše spor da se nosi sa ubrzanim psihološkim i sociološkim promenama koje je sobom nosilo vreme automobilske revolucije /1/. Iako spor, razvoj tehnologije električnih vozila je i u to vreme bio značajan i to na području akumulatora koji su bili i ostali najslabija komponenta EV. U /1/ se navodi da je od 1910. do 1925. kapacitet akumulatora povećan za 35%, vek trajanja za 300%, radijus kretanja vozila za 230% i troškovi održavanja akumulatora su smanjeni za 65%.

EV nisu mogla da obezbede veću autonomiju između ostalog i zbog toga što elektrodistributivna preduzeća nisu pokazala interes da izgrađuju stanice za dopunjavanje baterija. Koliko je to uticalo da dodje do zastoja u razvoju EV detaljno je prodiskutovano u /1/. Da je ovaj razlog bitan ukazuje i činjenica da gradske servisne i transportne službe nisu masovnije koristile električna vozila. Radijus kretanja električnih vozila je i početkom ovog veka mogao da zadovolji potrebe takvih preduzeća. Ona najveća su imala flote električnih vozila čije baterije su dopunjavali u sopstvenim garažama dok je za manja i srednja preduzeća takvo rešenje bilo nerentabilno.

Jedan od mogućih uzroka koji su konačno u prvi plan izbacili vozila sa SUS motorom bila je pojava električnog pokretača SUS motora /4/. Uz upotrebu elektropokretača vožnja vozila sa SUS motorom postala je jednako udobna kao vožnja električnim vozilom (izuzev buke).

Posledica svih navedenih i nenavedenih nepovoljnih uslova za razvoj EV dovela je do gotovo potpunog prestanka razvoja i proizvodnje električnih vozila oko 1920. godine. Renesansa EV nastupa šezdesetih godina sa razvojem ekološke svesti kod ljudi /2/, /4/. Energetska kriza sedamdesetih dodatno je ubrzala istraživanja na polju EV /4/. U psihološkom i sociološkom smislu današnji ljudi su spremniji da prihvate EV jer je cilj da se zadrži stepen pokretljivosti koji je postignut, a ne da se on širi. Osim ovoga u /1/ se navodi i da ekonomski napredak omogućava velikom broju porodica da poseduje dva vozila od kojih bi jedno imalo veći radijus kretanja, a drugo bi bilo za svakodnevnu upotrebu. Navodi se i niz tehničkih i tehnoloških razlika u odnosu na početak ovog veka koje pogoduju razvoju EV u ovom trenutku. Kao dopunski argument se može navesti podatak iz /5/ da je procenat dugačkih putovanja (koja prevazilaze radijus kretanja EV) 10% do 20% od ukupnog puta koji pređu današnja vozila. Prvenstveno iz ekoloških, a i svih ostalih razloga prof. Chang izjavljuje u /6/ da je 21. vek, vek EV.

1.1 Ekologija, ekonomičnost i infrastruktura – faktori razvoja EV

Već je rečeno da je ubrzan razvoj EV prvenstveno motivisan ekološkim razlozima. Ova vozila direktno ne zagađuju okolinu jer ne ispuštaju izduvne gasove kako to čine vozila sa SUS motorima. Trend razvoja automobilske industrije vidi se iz činjenice da je 1950. godine na svetu bilo oko 53 miliona motornih vozila, da bi ih 1992. bilo pola milijarde, a za početak ovog veka se prognozira da će taj broj premašiti jednu milijardu /6/. Ovako ubrzan rast broja motornih vozila je ozbiljna pretnja za životnu sredinu. Kada se uzme u obzir da se vozila u siromašnijim zemljama neadekvatno održavaju, a da su zastoji u saobraćaju svakodnevna pojava u razvijenim zemljama onda je globalna slika zagađivanja vazduha izduvnim gasovima iz SUS motora drumskih vozila zastrašujuća.

U /3/ i /7/ su navedeni podaci o štetnim materijama u izduvnim gasovima SUS motora kao i preračunat sadržaj tih gasova ispuštenih iz termoelektrana pri proizvodnji električne energije koja se troši u EV. Vidi se da je smanjenje emisije štetnih gasova veće od 90%. Kada se vrednuje učinak električnih vozila na zagađivanje vazduha treba imati u vidu da je najveći problem zagađivanje vazduha u gradovima. Upotrebom električnih vozila vazduh iznad gradova bi se potpuno očistio. Pretpostavlja se da u okolini elektrana nisu nastanjeni ljudi pa se efekti zagađenja u tim oblastima smatraju manje štetnim /3/. Sa druge strane da bi se sprečilo globalno zagrevanje usled efekta staklene bašte potrebno je smanjiti ukupnu količinu izduvnih gasova.

Druga fundamentalna prednost EV nad vozilima sa SUS motorom je to što ova vozila ne zavise od upotrebe fosilnih goriva čije su rezerve ograničene. U razvijenim zemljama za potrebe transporta otpada 60% ukupne potrošnje nafte /7/. Za proizvodnju električne energije se pored fosilnih goriva koriste obnovljivi izvori energije i nuklearna energija, a i od fosilnih goriva se ne koristi samo nafta već i ugalj i zemni gas. Ova raznolikost postojećih izvora kao i ubrzana istraživanja alternativnih izvora energije omogućuju neograničenu upotrebu električnih vozila.

Osim što se posredstvom EV koriste različiti izvori energije, ona su i energetske efikasnija od klasičnih vozila. To je posledica više faktora: konverzija toplotne energije u električnu se odvija u elektranama gde je taj proces maksimalno optimizovan, svi električni uređaji u EV su visoko efikasni tako da su gubici minimalni i što je najvažnije u EV se koristi mogućnost reverzibilnog kočenja pa se energija ne troši u slučaju zastoja u saobraćajnim gužvama. Samim tim se najveća ušteda energije u odnosu na vozila sa SUS motorom ostvaruje u uslovima gradske vožnje. U /7/ je izvršeno poređenje potrošene energije u vozilu sa SUS motorom i EV. Pokazano je da se u EV troši svega 60% energije potrebne za pokretanje klasičnog vozila iste klase.

Zbog toga što su ekološki čista i energetske efikasne, EV su postala predmet energetske politike razvijenih zemalja. Njihova budućnost je osigurana ne samo njihovim prednostima u odnosu na vozila sa SUS motorima već i propisima koji obavezuju proizvođače automobila da određen procenat svih prodatih vozila moraju sačinjavati vozila bez emisije izduvnih gasova (Zero Emission Vehicles – ZEV). U Kaliforniji trenutno važi propis o prodaji 2% takvih vozila, a od 2003. godine će udeo ZEV vozila biti povećan na 10%. Preračunato za 10 Američkih država i Washington DC koji imaju takve propise, sledeće godine bi na Američkom tržištu trebalo da se proda 290.000 EV /3/. Pošto se i u drugim razvijenim zemljama radi na sličnim programima može se očekivati brz porast tržišta električnih vozila.

Za uspeh EV na tržištu neophodno je obezbediti odgovarajuću infrastrukturu. Tu se prvenstveno misli na stanice za dopunjavanje baterija. Mnogo se radi i na razvoju tehnologije punjenja baterija. Poseban aspekt je bezbednost korisnika i sigurnost uređaja. Za razliku od situacije s početka ovog veka sada se projektovanju i izgradnji stanica za punjenje posvećuje adekvatna pažnja. Razvijaju se standardi u okviru IEC (International Electrotechnical Commission) i SAE (Society of Automotive Engineers), a u SAD je formiran i Nacionalni savet za infrastrukturu za EV /8/. Od takvog, sistematskog pristupa se očekuju i adekvatni rezultati, ali

će izgradnja infrastrukture svakako trajati izuzetno dugo. Ohrabrenje pružaju podaci izneti u /36/, gde je godinu dana korišćeno EV sa ugrađenim punjačem koji se napaja iz standardne instalacije. Zaključeno je da se i bez izgradnje stanica za dopunjavanje ovakva vozila već sada mogu uspešno koristiti.

1.2 EV – vozila budućnosti ili sadašnjosti

Procenat EV koji se prodaje na današnjem tržištu zanemarljivo je mali. Sudeći po tome vreme EV tek dolazi. Međutim, svi veliki svetski proizvođači automobila imaju svoj električni program. Pobrojati sve modele koji su se pojavili na tržištu zaista je nemoguće jer su tu *GM EV1*, *Ford Ranger EV*, *Ford e-Ka*, *Honda EV+*, *Nissan Hypermini*, *Toyota e-Com*, *Peugeot 106 Electric* i ostali. U ovom trenutku se električna vozila uglavnom prodaju kao službena vozila raznih servisnih i dostavnih gradskih službi. Tome se mogu dodati i električni skuteri i laka električna dostavna vozila, a nikako se ne sme zaboraviti na hibridna električna vozila.

Pored toga što su na tržištu prisutna električna vozila, moguće je naći i određene komponente za ta vozila, kako za samogradnju i prepravku klasičnih vozila tako i za izradu novih vozila. Kao proizvođači električnih motora i kompletnih pogonskih sistema na tržištu su prisutni *Solectria Corporation*, *Unique Mobility Inc.*, *AC Propulsion Inc.*, *Siemens* i mnogi drugi. Proizvođači vučnih akumulatora su prisutni sa različitim vrstama baterija o čemu će kasnije biti više rečeno.

Kompletna tehnička rešenja se mogu naći na tržištu, ali su naučne institucije i projektni biro i dalje veoma zauzeti na unapređenju postojećih i iznalaženju novih rešenja. Samo u SAD postoji niz nevladinih i vladinih institucija koje se bave razvojem EV. Pomenimo samo nekoliko: *DOE (U.S. Department of Energy)*, *USABC (U.S. Advanced Battery Consortium)*, *PNGV (Partnership for New Generation of Vehicles)* i mnogi drugi.

Ovako živa događanja u vezi sa razvojem i projektovanjem EV su znak da je vreme da ona postanu svakodnevnica. Iako prisutna na tržištu, u medijima i na internetu ova vozila još nisu izborila mesto koje im pripada. Po svemu sudeći neće se još dugo čekati na to.

2. ELEKTRIČNA VOZILA

Cilj ovog poglavlja je da se ukratko opišu pojedini tipovi EV i da se definišu određeni pojmovi. Ovo je potrebno da bi se kasnije lakše obrađivala glavna tema rada - električne mašine za EV. Treća uloga ovog poglavlja je da se čitava tema stavi u odgovarajući kontekst. Ovde će, dakle, biti opisani različiti tipovi električnih vozila kao celina, njihovi najbitniji delovi, izuzev električnih mašina kao i određena “infrastrukturna” pitanja.

2.1 Tipovi električnih vozila

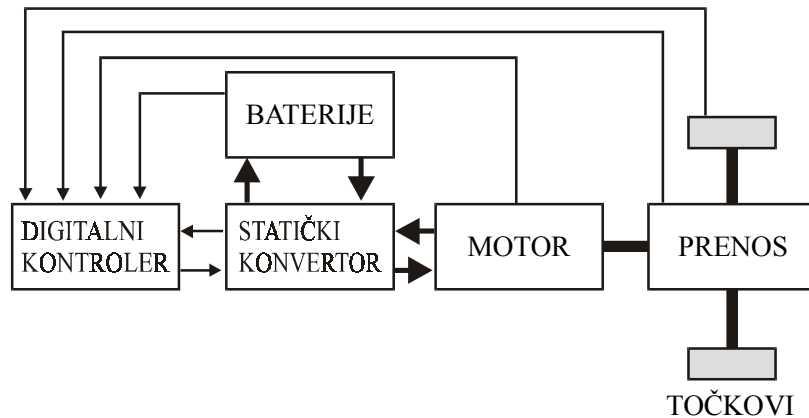
2.1.1 Potpuno električna vozila (EV)

Potpuno električna vozila ili EV kako će se u daljem tekstu koristiti ovaj termin¹ su vozila koja za svoje kretanje koriste električnu energiju uskladištenu u baterijama akumulatora ili je dobijaju iz gorivnih ćelija. Pogonski deo vozila sačinjavaju sledeći podsistemi: akumulatori, pretvarač energetske elektronike, električni motor i u najvećem broju slučajeva mehanički sistem za prenos snage. Električni motor je jedina instalirana električna mašina u vučnom podsistemu vozila i njegova snaga je jednaka snazi potrebnoj za vuču. Šematski prikaz EV sa svim njegovim podsistemima dat je na Sl. 1. Na toj slici su tankim linijama prikazane

¹ U dosadašnjem tekstu su pod EV podrazumevana i potpuno električna vozila i hibridna električna vozila.

informacione i upravljačke veze pojedinih podsistema, dok debele linije označavaju energetske veze u sistemu. Strelice označavaju smer kretanja informacija, odnosno električne energije.

Ovakva vozila ne ispuštaju nikakve izduvne gasove te se klasifikuju kao ZEV – *Zero Emission Vehicles*. Ovo znači da su ona ekološki prihvatljiva uz pretpostavku da se pažljivo rukuje akumulatorima jer pojedini tipovi akumulatora sadrže veoma otrovne materije. Nedostatak EV su njihove relativno loše vozne karakteristike. Tu se prvenstveno misli na mali radijus kretanja, na relativno slaba ubrzanja i male konačne brzine zbog velike težine akumulatora. U slučaju velikog broja vozila velika masa akumulatora i loš raspored težine uslovljavaju i loše ponašanje vozila u krivinama.



Sl. 1. Blok šema EV

Kako je to već napomenuto, ograničen radijus kretanja može da zadovolji potrebe u najvećem broju slučajeva. Ovo se posebno odnosi na flote vozila gradskih službi pa se u tim službama najčešće i javljaju EV. Razvoj i šira primena EV u direktnoj su vezi sa izgradnjom infrastrukture za dopunjavanje baterija kao i sa razvojem efikasnijih baterija koji treba da doprinesu povećanju autonomije i boljim voznim karakteristikama ovih vozila.

2.1.2 Hibridna električna vozila (HEV)

HEV spadaju u vozila sa niskom emisijom štetnih gasova (*LEV – Low Emission Vehicles*) jer pogonski sistem sačinjava i neki od toplotnih motora, a ne samo električni motor. Kompletan pogonski sistem sačinjavaju: toplotni motor, električni generator, električni motor, energetski pretvarač i akumulatorske baterije koje služe za podmirivanje vršne snage ili isključivo električni pogon pri polasku vozila i u gradskim centrima. Smisao postojanja HEV se nalazi u činjenici da ova vozila nemaju problema sa radijusom kretanja jer koriste hemijsko gorivo za pogon toplotnog motora i istovremeno su ekološki čistija i efikasnija u odnosu na klasična vozila jer koriste pogodnosti električnog pogonskog sistema. Snaga instalisanih toplotnih i električnih mašina je veća od potrebne vučne snage i sam sistem je neuporedivo složeniji od EV i vozila sa SUS motorom.

Postoje dve osnovne konfiguracije HEV: serijska i paralelna. Izuzetak je *Toyotin* model *Prius* koji je kombinovano, serijsko-paralelno HEV [9]. Kod serijskih vozila toplotni motor pokreće poseban generator kojim se vučni motor snabdeva električnom energijom i dopunjavaju akumulatori. Smisao uvođenja rednih HEV je isti kao kod dizel električnih lokomotiva. Toplotni motor se koristi u optimalnom radnom režimu, a regulacija brzine se ostvaruje električnim motorom. Postojanje akumulatora i električnog motora omogućava reverzibilno kočenje čime se povećava efikasnost vozila.

Paralelna HEV su koncipirana tako da točkove pokreću i toplotna mašina i električni motor/generator. Toplotna mašina i kod ovog vozila radi u optimalnom režimu, pri čemu električna mašina radi kao generator i dopunjava baterije kada je za kretanje vozila potrebna manja snaga od snage toplotnog motora, a kada je potrebna veća snaga, onda električna mašina

radi kao motor koristeći energiju iz akumulatora. Smisao uvođenja ovakve topologije HEV se može tražiti u činjenici da je instalirana snaga električnih mašina manja, čime je smanjena i težina vozila. Umesto posebnog motora i generatora ovde se koristi samo jedna mašina čija je snaga manja od snage vučnog motora kod serijskih vozila sličnih dimenzija.

Kod *Prius*-a postoje i motor i generator, ali manjih snaga nego da je u pitanju čisto serijska topologija. Prema potrebama vožnje moguće je da SUS motor pokreće samo generator ili da zajedno sa motorom pokreće točkove, a da generator miruje. Ovakav pogon podrazumeva upotrebu komplikovane mehaničke transmisije.

U HEV se koriste baterije drugačijih karakteristika u odnosu na EV. U ovom slučaju je mnogo značajnija specifična snaga i mogućnost brzog punjenja i pražnjenja akumulatora nego njihova velika specifična energija kao što je slučaj kod EV. Kapacitet akumulatora je manji nego kod EV.

Tehnologija HEV je potpuno razvijena tako da bi ona mogla da zamene klasična vozila. Radijus kretanja nije problem kao ni infrastruktura jer se koriste standardne benzinske pumpe. Jedini nedostaci su njihova velika cena, velika masa i složenost.

Kao zanimljivo rešenje potrebno je izdvojiti prikolice za povećanje radijusa kretanja. Jedna takva prikolica je prikazana u /5/. Ove prikolice su namenjene za upotrebu sa EV kada se ide na duži put. U takvoj konfiguraciji EV i prikolica predstavljaju serijsko HEV. U svakodnevnom korišćenju vozila prikolica se ne upotrebljava. Prikolicu sačinjavaju toplotna mašina i generator. Ovo je ekonomično rešenje za previlaženje problema ograničene autonomije EV.

2.2 Izvori električne energije

2.2.1 Savremeni akumulatori i autonomija električnih vozila

Idealni akumulatori se odlikuju nizom protivrečnih svojstava. Oni moraju da imaju veliku specifičnu snagu i energiju, da se brzo pune, da mogu da se isprazne do kraja, da imaju veliki kapacitet i veliki stepen korisnog dejstva kao i nisku cenu. Akumulatori koji imaju veliku specifičnu energiju obično imaju manju specifičnu snagu. Kako je za EV neophodno koristiti akumatore sa velikom specifičnom energijom, njihova dinamička svojstva će biti lošija nego što je to slučaj sa HEV kod kojih se primenjuju akumulatori sa velikom specifičnom snagom. Ograničenje za primenu rekuperativnog kočenja predstavlja maksimalna struja punjenja akumulatora. Veoma važan parametar vezan za akumatore je njihov životni vek koji se meri u broju ciklusa pražnjenja i punjenja.

Pitanje akumulatora za električna vozila je očigledno vrlo kompleksno. U Tab. 1 su prikazani neki tipovi akumulatora na osnovu podataka iz /3/, /7/ i /10/. Detaljnije razmatranje ovog problema prevazilazi okvire ovog rada.

Tab. 1 Uporedne karakteristike nekoliko tipova akumulatora

Tip	Specifična energija [Wh/kg]	Gustina energije [Wh/l]	Specifična snaga [W/kg]	Stepen korisnog dejstva [%]	Vek trajanja [ciklusa]	Približna cena [US\$/kW]
Pb, unapr.	35-40	70	100-150	68	300-500	100-150
Ni-Fe	51	?	99	58	920	?
Ni-Cd	45.3	?	260	80	2000	?
Ni-MH	50-60	175	200	76	600-1000	300-400
Zn-Br	79	?	40	75	350	?
Na-S	81	?	152	91	600	?
Li-Jon	80-90	200	<1000	80	?	?
Li-Polimer	100	?	200	85	200-300	?

Autonomija EV, odnosno radijus njihovog kretanja između dva dopunjavanja akumulatora, zavisi prvenstveno od kapaciteta akumulatora, ali i od efikasnosti EV, režima vožnje, dodatnih potrošača u vozilu i sl. Analiza uticaja konstrukcije EV na njegovu autonomiju data je u /11/. Moglo bi se usvojiti da je tipičan radijus kretanja od 120 do 200 km, zavisno od uslova vožnje.

2.2.2 Punjenje akumulatora

U svakom EV i HEV se mora predvideti više načina za dopunjavanje akumulatora /3/. Među te načine neki autori ubrajaju i rekuperativno kočenje. Ovde će se pomenuti samo neki od načina dopunjavanja baterija iz spoljašnjih izvora električne energije dok se rekuperativno kočenje razmatra kao jedan radni režim vozila. U /8/ su definisana tri nivoa dopunjavanja baterija:

1. Punjenje piključenjem vozila na kućnu monofaznu utičnicu. Punjenje se vrši preko punjača ugrađenog u vozilo sa snagom do 2 kW;
2. Punjenje akumulatora sa snagom punjača od oko 6 kW, gde to punjenje traje 6 – 8 sati i
3. Brzo punjenje snagom od 22 do 120 kW pri čemu se akumulator mora napuniti do $\frac{1}{2}$ svog kapaciteta za 10 do 15 minuta.

Za punjače nivoa 3 predviđeno je induktivno punjenje gde se koriste struje visokih učestanosti, od 40 do 350 kHz, a efikasnost punjača je preko 90% /3/. Osim ovih načina predviđa se i punjenje tokom vožnje kada se koriste specijalne sekcije autoputeva. Ovo punjenje može da bude kontaktno ili induktivno.

2.2.3 Solarne ćelije, gorivne ćelije i reformeri

Solarne ćelije montirane na krov i haubu automobila bi trebale da posluže kao dopunski izvor za punjenje akumulatora. Međutim, na današnjem stepenu razvoja solarnih ćelija one to ne mogu da budu jer je potrebno 5 sunčanih dana da se potpuno napuni akumulator pomoću solarnih ćelija /3/. Njihov stepen korisnog dejstva je svega 16% tako da će se na solarni automobil dugo čekati i pored velikog angažovanja entuzijasta i naučnika širom sveta. Pa ipak, ako cena ćelija bude dovoljno niska njihova masovna upotreba za dopunjavanje akumulatora može da ima značajan uticaj na ekološke i energetske prilike na zemlji.

Gorivna ćelija je hemijski izvor električne energije kod kog se, za razliku od akumulatora, reagensi uvode u ćeliju direktno iz rezervoara tokom njenog rada. Dakle, gorivne ćelije se ne moraju prethodno puniti. Najefikasnije gorivne ćelije su one koje koriste vodonik.

Vodonik je opasan i nezgodan za skladištenje i distribuciju pa se zbog toga uvode reformeri. Reformeri su mali hemijski reaktori u kojima se izdvaja vodonik potreban za rad gorivnih ćelija. U njima se kao gorivo može koristiti benzin čime se u potpunosti prevazilazi problem nepostojanja infrastrukture za dopunjavanje akumulatora EV.

Nedostaci gorivnih ćelija su isti kao i za akumulatore. Njihova specifična snaga je mala pa su i one kao i akumulatori velike mase i dimenzija. Uz same gorivne ćelije potrebno je da se u vozilo ugradi i rezervoar za vodonik ili rezervoar za benzin i reformer što zahteva dodatan prostor i dodatno opterećuje vozilo. I pored svih nedostataka gorivna ćelija je uz HEV tehnologija koja najviše obećava.

2.2.4 Savremeni toplotni motori

Da bi uopšte imalo smisla koristiti HEV neophodno je koristiti usavršene toplotne motore. Za sada se primenjuju gasne turbine, dizel i benzinski motori. Ako se radi o benzinskim motorima onda su oni usavršeni tako da imaju minimalnu potrošnju i minimalnu koncentraciju štetnih materija u izduvnim gasovima. Na primer, *Toyota Prius* koristi četvorotaktni benzinski motor koji radi po Atkinsonovom umesto po Otovom toplotnom ciklusu. Da bi takav motor došao do punog izražaja neophodno je da radi u optimalnom režimu što je kod HEV ostvarivo.

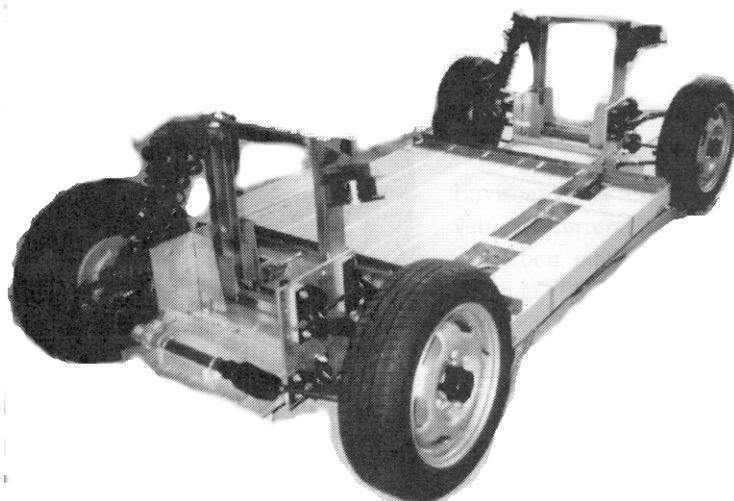
U /12/ je prikazan hibridni automobil *Volvo ECC* kod kog se koristi generator sa stalnim magnetom integrisan sa gasnom turbinom. Gasne turbine moraju da rade sa izuzetno velikom brzinom obrtanja pa i generator mora biti prilagođen takvom radnom režimu. Kada se koriste dizel toplotni motori neophodno je koristiti generatore za male brzine. Ovo znači da je osnovni zadatak pri konstrukciji HEV uskladiti karakteristike generatora i toplotnog motora.

2.3 Konstrukcija EV i HEV

Kako je već napomenuto konstrukciji EV treba posvetiti posebnu pažnju. Dosadašnja praksa je bila da se standardni modeli sa SUS motorima prepravljaju tako da imaju električni pogon. Ovakav pristup pokazuje niz svojih nedostataka. Električni pogon ostavlja veću slobodu projektantima EV nego što je imaju projektanti klasičnih automobila. Međutim, postoje i neka ograničenja o kojima se takođe mora povesti računa.

2.3.1 Specifičnosti konstrukcije EV

Pri konstruisanju EV mora se voditi računa o specifičnostima takvog vozila. Potrebno je znati koje su njihove prednosti, a šta su im mane. Prednosti su mala potreba za održavanjem i mala buka, a nedostatak je velika masa akumulatora. Da bi se postigle što bolje vozne karakteristike potrebno je da težište vozila bude što niže. Optimalno rešenje sa toga aspekta je konstrukcija EV sa kutijastom šasijom u koju se smeštaju akumulatori. Sl. 2. prikazuje šasiju jednog takvog modela. Preduslov za konstrukciju takve šasije je da se primenjuju motori u točku kako bi ostalo dovoljno prostora za akumulatore. Akumulatori su posebne konstrukcije tako da mogu da stanu u predviđeni prostor.



Sl. 2. Šasija sa prostorom za akumulatore

Na osnovu činjenica saopštenih u /36/ moguće je steći uvid u razlike u konstrukciji EV i vozila sa motornim SUS. Prilikom prepravke standardnog vozila koja je tamo opisana bilo je potrebno prepraviti donji deo vozila kako bi se akumulatori smestili u poseban tunel po sredini vozila. Ovo je podrazumevalo preduzimanje određenih zahvata i u unutrašnjosti vozila, ali je dobijen rezultat koji daleko prevazilazi klasične prepravke, kako po voznim svojstvima, tako i po komforu koji je maksimalno sačuvan.

Osnovni cilj projektanta EV je da ono bude što lakše i da otpori vazduha i kotrljanja budu što manji. I sa ovog aspekta je značajno imati specijalno konstruisano vozilo. Ono može da ima ravan pod budući da izostaju elementi transmisije, izduvna cev i slično. Prednost ravnog poda je mali otpor vazduha /11/.

U specifičnosti konstrukcije EV spada i konstrukcija raznih pomoćnih uređaja i električnog sistema uopšte. U EV nema drugog izvora električne energije osim vučnih

akumulatora pa je potrebno sve uređaje konstruisati maksimalno efikasno. Jedan karakterističan primer se navodi u /3/. Radi se o sedištu u koje je ugrađen sistem za kontrolu temperature. Ušteda energije ogleda se u tome da se ne kondicionira čitava unutrašnjost vozila već samo putnici. Snaga ovakvog sistema iznosi 100W po putniku dok standardan klima uređaj troši od 1 do 4 kW /3/.

Pošto je opseg temperatura u kojima se primenjuju EV izuzetno velik, neophodno je voditi računa i o primenljivosti vozila na niskim temperaturama. Jedan od problema pri niskim temperaturama je usporenje elektrohemijskih reakcija u akumulatorima. Da bi se ovaj efekat sveo na minimum kako pri punjenju i mirovanju akumulatora tako i u toku njihove upotrebe, nužno je predvideti odgovarajuću izolaciju i grejače prostora za akumulatore kako je to učinjeno u /36/. Naravno, u letnjim uslovima ostaje potreba za efikasnim odvođenjem toplote sa svih delova vučnog sistema pa i sa akumulatora.

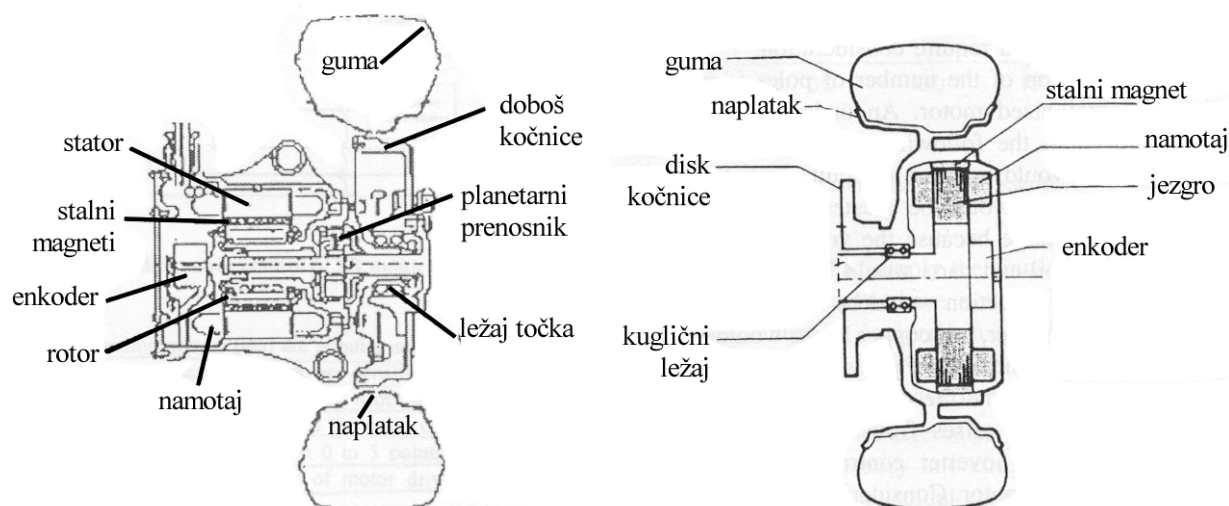
2.3.2 Prenos snage sa motora na točkove

Već je rečeno da se pri konstruisanju EV predviđa elektronska regulacija brzine vozila i da nema potrebe za ugradnjom menjača. Određenim konstrukcijama motora izbegava se i upotreba diferencijala. Da bi se izbegla upotreba prenosnih vratila koriste se motori u točku. Da li to znači da takva EV uopšte nemaju transmisiju? Odgovor nije jednoznačan.

Kao što je poznato snaga na vratilu motora srazmerna je njegovom momentu i brzini obrtanja, relacija (2.1). Sa M je označen momenat na vratilu, a ω je ugaona brzina vratila.

$$P_m = M \cdot \omega \quad (2.1)$$

Da bi se dobio kompaktan motor velike snage potrebno je da on radi sa velikom brzinom što je detaljnije opisano u 3.1.1. Veliki broj vučnih motora upravo radi na takvim, velikim, brzinama. Da bi takav motor pokretao vozilo neophodna je primena prenosnog mehanizma sa velikim stepenom redukcije. Planetarni prenosnici koji imaju prenosne odnose 12:1 ili 11:1 /3/, /4/ i /7/ se najčešće primenjuju u takvim slučajevima. Ovakve prenosnike je moguće iskoristiti i pri konstrukciji motora u točku kako je pokazano na Sl. 3. a). Njihova odlika je i visok stepen korisnog dejstva što ih takođe preporučuje za primenu u EV.



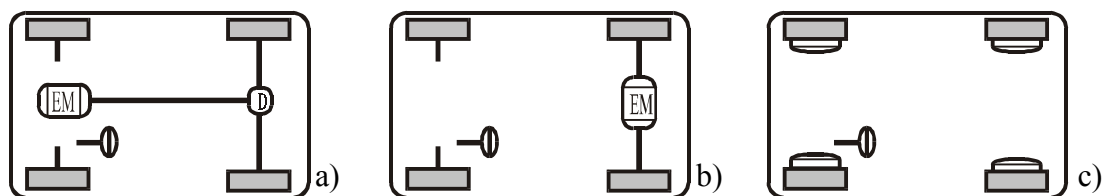
Sl. 3. a) Motor i reduktor (planetarni prenosnik) u točku
b) Motor sa spoljašnjim rotorom u točku

Postoje, naravno, i druga rešenja. U velikom broju slučajeva konstruktori EV se odlučuju da potpuno izbacе prenosni mehanizam. Za te potrebe konstruišu se motori u točku koji imaju

spoljašnji rotor na koji se pričvršćuju kočnice i naplatci sa gumama, Sl. 3. b). Ovakav pristup je mehanički jednostavniji, ali se uvećava broj energetskih pretvarača i kontrolnih kola.

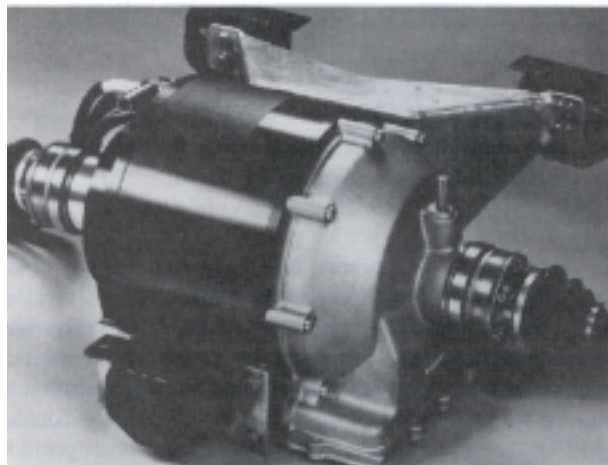
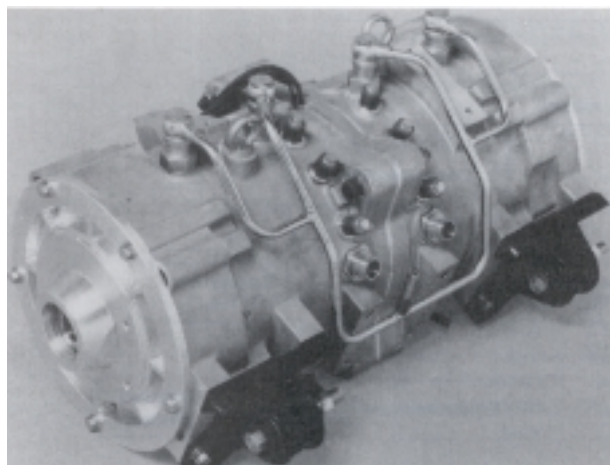
2.3.3 Moguće konfiguracije pogonskih sistema

Klasičan pogonski sistem se sastoji od motora (SUS), transmisije (menjač, vrtila, diferencijal) i točkova. Kada se primenjuje električan pogon izostaje potreba za menjačem stepena prenosa jer se promena brzine ostvaruje električnim putem, čime automobil postaje jednostavniji za jedan sklop. Motor (električni) se vezuje direktno na reduktor i diferencijal. Ovo je prikazano na Sl. 4. a).



Sl. 4. Moguće konfiguracije pogonskog sistema

Konstruktori EV se često opredeljuju za sisteme sa više od jednog motora. Na ovaj način se gubi potreba za diferencijalom. Drugi način da se izbegne upotreba diferencijala jeste da se vučni motori specijalne konstrukcije (sa dvostrukim rotorom) postave na mesto gde se kod klasičnih vozila nalazi diferencijal. Takava rešenja su primenjena kod *BMW E1* i *Nissan FEV*. Ovakva konfiguracija prenosnog sistema prikazana je na Sl. 4. b). Kakve je konstrukcije motora moguće primeniti u takvim slučajevima biće diskutovano u 4. poglavlju, a na Sl. 5. su prikazane dve izvedbe takvih motora.



Sl. 3. Motori Nissan FEV i BMW E1

Sl. 4. c) prikazuje EV sa pogonom na sva 4 točka pri čemu su motori ugrađeni u točkove. Na ovaj način štedi se na unutrašnjem prostoru u vozilu. Osim uštede u prostoru dobija se i vozilo sa pogonom na 4 točka, koja se odlikuju odličnim voznim svojstvima.

3. POTREBNE KARAKTERISTIKE ELEKTRIČNIH MAŠINA ZA EV I HEV

U prethodnom poglavlju je napomenuto da je konstruisanje EV veoma ozbiljan i specifičan posao. Izbor vučnih motora i ostalih komponenti pogonskog sistema je jedan od najbitnijih segmenata tog posla. Ovde će ukratko biti navedene karakteristike vučnih motora EV i HEV i generatora HEV vozila.

3.1 Vučni motori

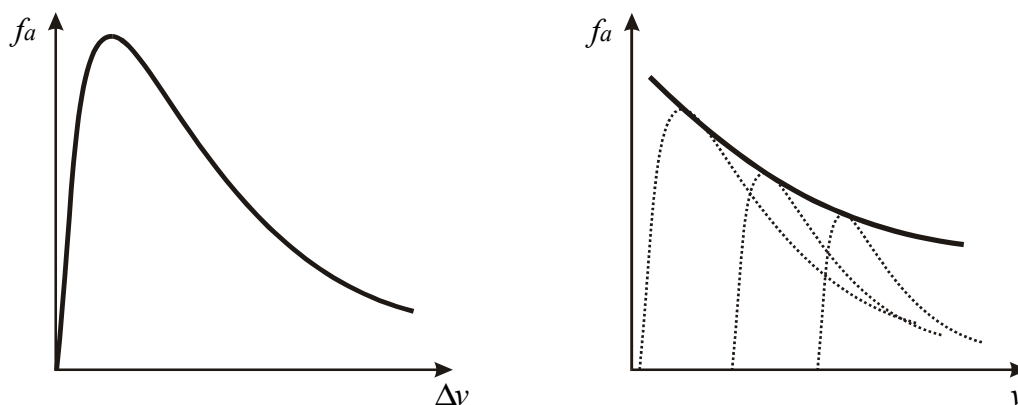
Izbor vučnih motora prvenstveno zavisi od potrebne snage i momentne karakteristike motora. Kakve karakteristike treba da ima vučni motor dobro je poznato. Postupak proračuna prikazan je u /4/, a ovde će u okviru tačke 3.1.1 biti samo ukratko prikazan.

Kada je izbor tipa motora u pitanju tu još uvek nema standardnih rešenja. Pojedini tipovi motora biće opisani u narednom poglavlju, a u 8. poglavlju će se navesti uporedne karakteristike motora kao pokušaj da se da odgovor na pitanje koji motor treba iskoristiti u pojedinim situacijama.

Svi stručnjaci se slažu u pogledu robusnosti vučnih motora. Pošto se ovi motori koriste u najsloženijim uslovima rada neophodno je da budu izuzetno robusne konstrukcije. U nekim radovima se čak pominju motori, odnosno, pogoni otporni na kvarove. Bez obzira na tip motora njegova konstrukcija mora da bude robusna kako bi se uspešno primenjivao u vuči EV i HEV.

3.1.1 Adhezija i otpori vuče – momentna karakteristika vučnog motora

U električnoj vuči princip za izbor vučnih motora je da se maksimalno iskoriste sile adhezije. Sile adhezije su definisane kao sile privlačenja među atomima dva različita tela koja su u kontaktu. Ovim silama možemo da zahvalimo što je uopšte moguće kretanje vozila jer one predstavljaju silu reakcije podloge na obodnu silu točka /13/. Pošto kod električnih vozila sile vuče teško mogu da premaše sile adhezije u normalnim pogonskim uslovima, a oni su merodavni za dimenzionisanje motora, ovde je na Sl. 6. prikazana samo zavisnost koeficijenta adhezije od brzine (pseudo)klizanja točka i brzine kretanja vozila. Relacija (3.1) je relacija po kojoj se računa maksimalna adheziona sila. U relaciji (3.1) m_a je takozvana adheziona masa vozila koja predstavlja masu vozila koju “nose” pogonska vratila (za pogon na sve točkove jednaka je masi vozila), g je gravitaciona konstanta, a f_a je koeficijent adhezije.



Sl. 6. Zakonitosti promene koeficijenta adhezije sa brzinom proklizavanja Δv i brzinom v

$$F_{a \max} = m_a \cdot g \cdot f_a \quad (3.1)$$

Vučna sila mora da bude manja ili jednaka maksimalnoj adhezionaloj sili $F_{a \max}$ kako ne bi došlo do proklizavanja točka. Naravno, vrednost koeficijenta adhezije jako zavisi od stanja puta. Na zaleđenom i mokrom putu koeficijent adhezije je značajno manji nego na suvom putu.

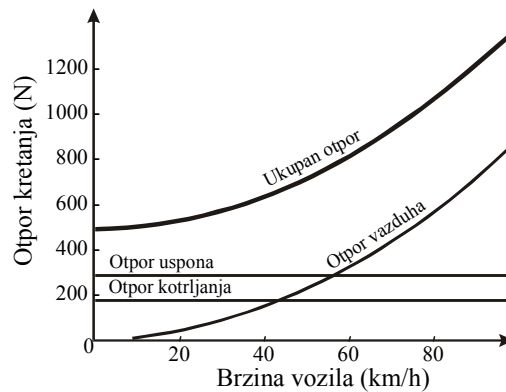
Prilikom kretanja vozila javljaju se takozvani otpori vuče. Oni se suprotstavljaju tom kretanju i vučna sila mora da bude veća ili jednaka tim otporima da bi se vozilo uopšte kretalo. Otpori vuče se dele na stalne i povremene. Stalni su otpori kotrljanja sa otporima trenja u ležajevima i otpor vazduha, a povremeni otpori krivine, otpori uspona i otpori inercijalnih masa /13/.

Za potrebe izbora motora moguće je zanemariti promenu otpora kotrljanja sa brzinom. Od povremenih otpora posmatra se samo otpor uspona koji je nezavisan od brzine i zavisi samo

od nagiba strme ravni. Otpor kretanja konstantnom brzinom na usponu prikazan je relacijom (3.2), a njegova zavisnost od brzine na Sl. 7.

$$F_{ot} = F_{ko} + F_u + F_{ov} = \mu \cdot m \cdot g + m \cdot g \cdot \sin \alpha + \frac{\rho \cdot C_w \cdot A}{2} \cdot (v + v_v)^2 \quad (3.2)$$

Oznake korišćene u prethodnoj relaciji imaju sledeća značenja: F_{ko} – otpor kotrljanja sa uračunatim otporima mehaničkog trenja u ležajevima, F_u – otpor uspona koji sa horizontalom gradi ugao od α stepeni, F_{ov} – sila otpora vazduha, μ – koeficijent trenja kotrljanja, m – masa vozila, g – gravitaciona konstanta, ρ – gustina vazduha, A – površina prednjeg dela vozila, C_w – koeficijent otpora vazduha, v – brzina kretanja vozila i v_v – brzina čeonog vetra.



Sl. 7. Zavisnost otpora vuče od brzine

Da bi vozilo ubrzalo neophodno je da vučna sila vozila bude veća od sile otpora kretanja. Ubrzanje se određuje po relaciji (3.3) koja je ključna relacija za određivanje mehaničke karakteristike vučnih motora. F_v je vučna sila, a ε je koeficijent prividnog povećanja mase usled postojanja rotacionih delova pogonskog sistema koji se svojim momentima inercije odupiru povećanju brzine /13/ i /4/. Koeficijent prividnog povećanja mase kreće se oko vrednosti od 10% /13/.

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{F_v - F_{ot}}{(1 + \varepsilon) \cdot m} \quad (3.3)$$

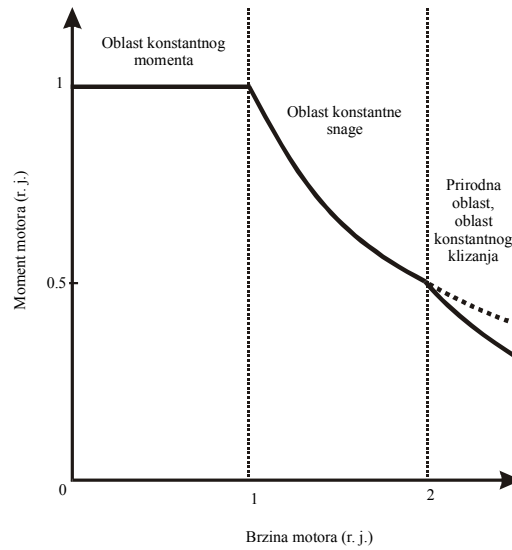
Kada se bira snaga vučnog motora potrebno je usvojiti vrednosti performansi koje želimo da dobijemo. To su ubrzanje, nazivna brzina vozila, maksimalna brzina vozila i podaci o vozilu: masa, koeficijent trenja kotrljanja, koeficijent otpora vazduha, prečnik točka. Iz /4/ se vidi da je izbor dovoljno izvršiti prema željenom ubrzanju i zatim proveriti da li tako odabran vučni sistem može da zadovolji pri maksimalno željenoj brzini.

Da bi se odredila potrebna snaga motora pretpostavlja se da motor u početku ubrzava sa konstantnim momentom do nominalne brzine motora svedene na brzinu vozila v_{mn} , a zatim ubrzava sa konstantnom snagom do nazivne brzine vozila v_{vm} . Ovakav režim rada motora prikazan je na Sl. 8. Vučne sile u oba režima rada date su u relaciji (3.4), a rešenje diferencijalne jednačine (3.3) koje se dobije kada se iskoristi relacija (3.4) dato je relacijom (3.5). Već je napomenuto da je zanemarena zavisnost otpora kotrljanja od brzine da se ne bi dobila transcendentalna jednačina. U /4/ je pokazano da rešenje dobijeno na ovaj način sasvim malo odstupa od stvarnog rešenja i da sasvim pouzdano može da se iskoristi za kvalitativnu analizu.

$$F_v = \begin{cases} \frac{P_n}{v_{nm}}; & v < v_{nm} \quad (M = \text{const.}) \\ \frac{P_n}{v}; & v > v_{nm} \quad (P = \text{const.}) \end{cases} \quad (3.4)$$

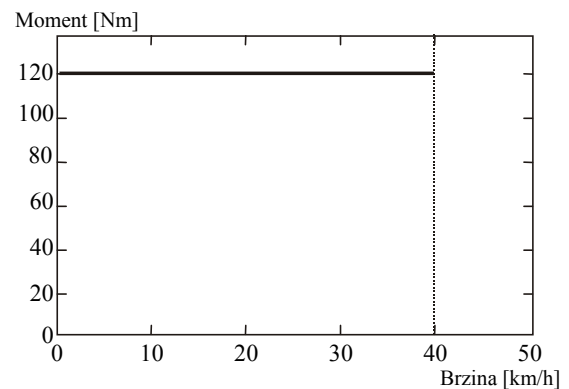
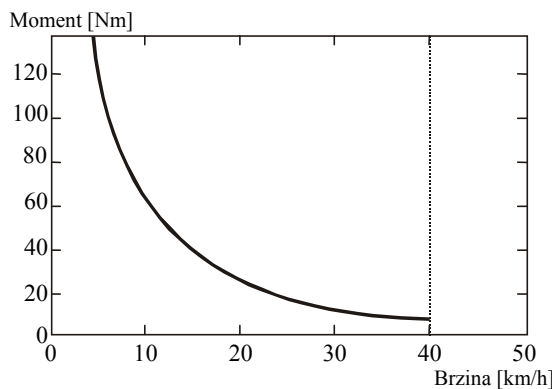
$$P_n = \frac{m}{2 \cdot t_u} (v_{nm}^2 + v_{nv}^2) \quad (3.5)$$

U relaciji (3.5) sa t_u je označeno vreme za koje vozilo treba da ubrza do nominalne brzine.



Sl. 8. Momentna karakteristika motora

Da bi se minimizovala snaga motora moguće je diferencirati relaciju (3.5) i izjednačiti dobijeni izvod sa nulom. Dobijaju se rezultati koji se lako mogu razumeti iz dva primera. Ovi primeri su ilustrovani grafcima sa Sl. 9. U prvom slučaju se ubrzava sa konstantnom snagom do nazivne brzine vozila, a u drugom se to čini sa konstantnim momentom pri čemu je $P_{max}/P_{min}=2, /4/$. U prvom slučaju je snaga motora minimalna, a u drugom maksimalna dok je ubrzanje jednako. Ovo je lako razumljivo kada se iskoristi relacija (2.1) za izračunavanje snage motora.



Sl. 9. Ubrzavanje sa minimalnom i maksimalnom snagom i jednakim srednjim ubrzanjem

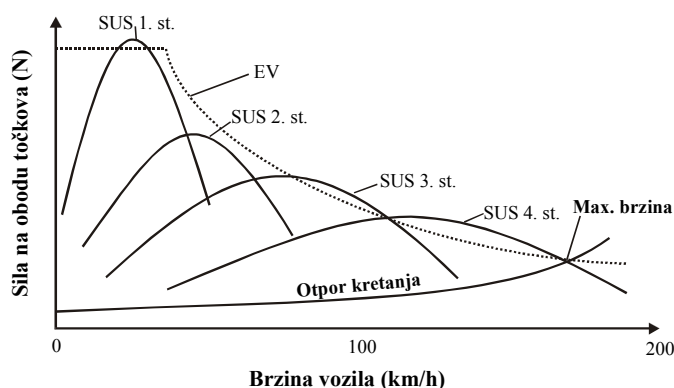
Za EV je od presudnog značaja ekonomičnost. Zbog toga se teži rešenjima sa minimalnom snagom motora jer ona obezbeđuju maksimalan domet EV kao i minimalnu masu motora. Da bi se to postiglo neophodno je proširiti opseg brzina za režim konstantne

snage. Posledica ovakve konstrukcije je veliki maksimalan moment motora koji se može smanjiti samo izborom motora velike brzine. Velikim brzinama se smatraju brzine motora od preko 10000 *1/min*, dok su srednje u opsegu od 6000 do 10000, a male ispod 6000 *1/min*. Kada se primenjuju motori za velike brzine primenjuju se i reduktori sa velikim prenosnim odnosom.

Da bi se izbegli preveliki momenti i naprezanja mehaničkog prenosnika snage potrebno je pronaći kompromisni odnos nazivnih brzina motora i vozila. Da bi se što manje koristio režim konstantnog momenta i da bi se izbeglo prekomerno povećanje momenata i naprezanja prenosnog mehanizma potrebno je predvideti da se maksimalna brzina vozila dostiže kada motor radi na takozvanoj prirodnoj karakteristici. To je deo karakteristike u kojem se snaga motora smanjuje sa povećanjem brzine (učestanosti). Ovaj režim rada se izbegava pri konstrukciji EV, ali se minimalna snaga vučnih motora ostvaruje ako se prelazak na prirodnu karakteristiku motora dešava pri nazivnoj brzini motora. Preduslov da se to ostvari je da je momenat na prirodnoj karakteristici motora dovoljan za savladavanje otpora vuče.

U [4] je opisana i metodologija proračuna potrebne snage električnog motora za paralelna HEV. Pri tome se koristi pretpostavka da SUS motor može da obezbedi kretanje vozila konstantnom nazivnom brzinom po usponu od 3% i da pri tome mora da ima dovoljno snage za pokretanje generatora koji dopunjava baterije. Procenjuje se da je za potrebe dopunjavanja baterije potrebno povećati minimalnu snagu SUS motora za 10%. Snaga električnog motora se određuje tako što se od snage određene kao za EV oduzme snaga SUS motora pri odgovarajućoj brzini.

Na Sl. 10 su prikazani i otpori vuče i vučna sila motora. Radi poredjenja na istoj slici je nacrtana i momentna karakteristika vozila sa SUS motorom i menjačem stepena prenosa. Sa slike je bez dodatnih objašnjenja jasno koje su prednosti električnog pogonskog sistema.



Sl. 10. Vučna sila, otpori vuče i momentna karakteristika vozila sa SUS motorom i EV

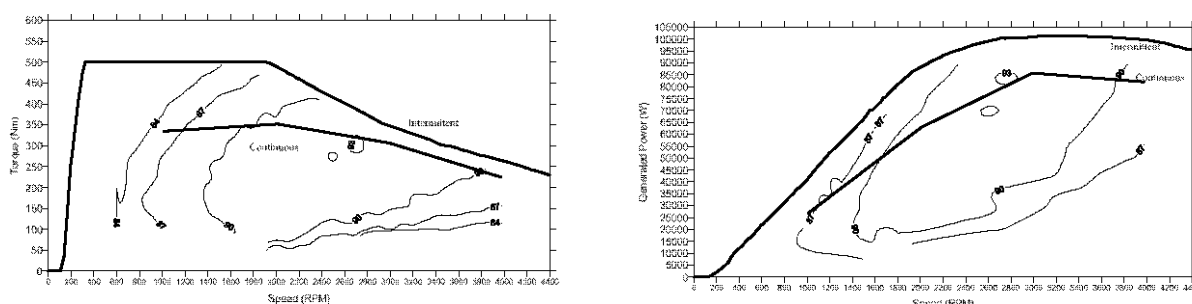
3.1.2 Rekuperativno kočenje

Da bi se povećao domet EV i da bi se smanjila potrošnja HEV neophodno je omogućiti rekuperativno ili regenerativno kočenje. Prilikom ovakvog usporavanja vozila motor prelazi u generatorski režim rada i dopunjava baterije. Koliki je kočioni momenat zavisi prvenstveno od primenjenih akumulatora, njihove maksimalne struje punjenja i stanja napunjenosti u trenutku kočenja.

Sve električne mašine su po svojoj prirodi reverzibilne što znači da ih je lako prevesti u generatorski režim rada. Zahtev za rekuperacijom automatski je zadovoljen upotrebom ma koje mašine pod uslovom da kontrolna elektronika obezbeđuje odgovarajuće upravljačke signale za energetske pretvarače.

Povećanje radijusa kretanja zahvaljujući rekuperativnom kočenju iznosi 5 do 10%. Osim povećanja radijusa kretanja, rekuperativno kočenje omogućava uštedu na održavanju mehaničkih

kočnica jer su one manje opterećene /14/. U /36/ se ocenjuje da zahvaljujući regenerativnom kočenju, obloge mehaničke kočnice ne moraju da se menjaju za čitav vek trajanja vozila (oko 260000 km). Dobra efikasnost vučnog motora u generatorskom režimu rada je neophodna da bi se ostvarilo uspešno rekuperativno kočenje. U /15/ se navodi da je kočioni momenat motora tog proizvođača pri rekuperaciji svega 10% manji nego u motorskom režimu. Iz istog izvora su reprodukovani i dijagrami efikasnosti sistema pri rekuperaciji dati na Sl. 11.



Sl. 11. Efikasnost vučnog sistema *Power Phase 100, Unique Mobility Inc.* pri rekuperaciji

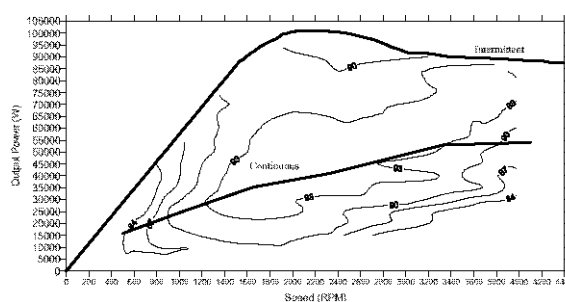
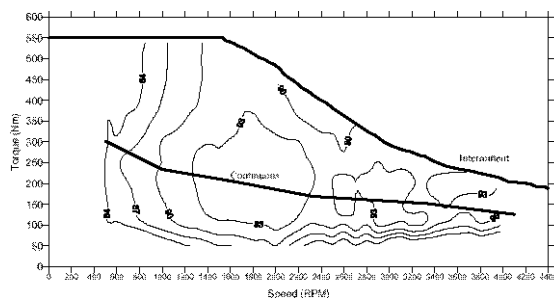
Korišćenje rekuperacije može da utiče i na lakoću i udobnost upravljanja vozilom. Ako se rekuperativno kočenje ostvaruje čim se pusti pedala akceleratora praktično se dobija vozilo koje se vozi pomoću jedne pedale. Potreba za primenom mehaničkih kočnica se uobičajeno javlja samo kada brzina vozila opadne na manje od 5 km/h i da bi se vozilo održalo u nepokretnom stanju na usponu /36/.

3.1.3 Specifična snaga, cena i stepen korisnog dejstva

Masa EV pa i HEV je izuzetno velika što za posledicu ima kako povećanje otpora vuče, relacija (3.2), tako i pogoršanje dinamičkih voznih karakteristika vozila i visoku cenu. Da bi se smanjila masa ovih vozila prvenstveno je potrebno povećati specifičnu snagu i energiju vučnih akumulatora, ali se ne sme zanemariti ni masa vučnih motora. Masa električnih mašina je posebno značajna kod serijskih HEV gde se koriste i motor i generator kao i toplotni motor. Kod EV i serijskih HEV kod kojih se koriste motori u točku značajno je minimizovati njihovu masu i dimenzije kako bi se pojednostavio sistem vežanja.

Američko ministarstvo energetike (*Department of Energy, DOE*) finansira projekte razvoja usavršenih motora za HEV u okviru projekta PNGV. Kao ciljne vrednosti su postavljeni specifična snaga od 2 kW/kg i specifična cena od 4 \$/kW za vučne motore snage 50 kW /16/. Ovo znači da bi jedan takav motor težio svega 25 kg i koštao 200\$. Pri tome treba imati na umu momentnu karakteristiku sa Sl. 8. i podatke iz /17/ i /18/ o mehaničkim momentima vučnih motora odgovarajuće snage koji se kreću od 90 do 150 Nm pri trajnom radu, a 240 do 400 Nm pri intermitentnom radu (ubrzavanju). Takve karakteristike su svojstvene SUS motorima čija je radna zapremina najmanje 2 l, a snage su od 110 do 150 kW /19/. Ovi SUS motori sigurno imaju znatno veću masu i zauzimaju neuporedivo veću zapreminu. Cena i složenost takvog (SUS) motora se ne mogu ni porediti sa cenom i jednostavnošću električnog motora.

Stepen korisnog dejstva električnih mašina i energetskih pretvarača inače je velik, ali se to pitanje zaoštava kada se radi o mašinama za primenu u EV i HEV. Stepenn korisnog dejstva svih savremenih vučnih motora iznosi preko 90%. Jasno je da svaki procenat povećanja stepena korisnog dejstva znači povećanje autonomije vozila ili smanjenje kapaciteta i mase akumulatora. Na Sl. 12 su reprodukovani grafici sa kojih se vidi efikasnost sistema iz /15/.



Sl. 12. Efikasnost vučnog sistema *Power Phase 100, Unique Mobility Inc. /15/* u motorskom režimu rada

3.1.4 Kontrolabilnost

Svi savremeni motori koji se koriste u električnoj vuči napajaju se iz energetske pretvarača. Za upravljanje pretvaračima koriste se sofisticirane tehnike koje u najvećoj mogućoj meri zavise od podataka koji se prikupljaju senzorima. Ovakvi sistemi se kasnije nadgrađuju posebnim, inteligentnim funkcijama poput onih koje su opisane u 6. poglavlju. Pošto su automobili, a posebno njihov pogonski sistem, izloženi mnogobrojnim nepogodnim uticajima iz okoline kao što su ekstremno niske i ekstremno visoke temperature, vibracije, mehanička naprezanja i slično, lako može doći do kvarova. Na kvarove su posebno osetljivi tanki vodovi za senzorske signale kao i sami senzori.

Da bi se predupredili takvi kvarovi ulažu se posebna sredstva za izradu mehaničke zaštite senzora i njihovih vodova. Ovakva zaštita je skupa i doprinosi povećanju ukupne mase vozila /20/. Da bi se predupredili mogući otkazi i da bi se izbegli skupi i teški sistemi za zaštitu senzora potrebno je preći na kontrolu motora bez senzora. Pri tome performanse pogona ne smeju biti narušene kao ni opseg rada pogona. Motor u EV mora da bude kontrolabilan u čitavom području brzine pa i u mirovanju.

U /20/ su prikazana najsavremenija rešenja na polju upravljanja električnim pogonima bez senzora. Smisao metoda prikazanih u tom radu je da se sama mašina iskoristi kao senzor brzine. Na ovaj način se eliminiše potreba za ugradnjom senzora, a signali na osnovu kojih se rekonstruišu brzina i rotacija sprovode se kroz energetske kablove koji su robusni. Nisu sve električne mašine podjednako pogodno da budu upotrebljene kao senzori. One mašine koje po samoj svojoj prirodi generišu signale neophodne za rekonstrukciju položaja imaju najveće šanse da budu prihvaćene kao vučni motori za EV i HEV.

3.1.5 Robusnost

Kako je to već napomenuto, sva oprema, a naročito vučni motori na EV i HEV rade u izrazito nepovoljnim uslovima. Da bi oni uspešno funkcionisali u dugom vremenskom periodu i svim uslovima, neophodno je prilikom konstrukcije voditi računa o nepovoljnim uslovima kojima su ovi uređaji izloženi.

U /37/ se može pronaći niz faktora koji utiču na konstrukciju specijalnih mašina. Što se tiče vučnih motora za EV/HEV najznačajnije je voditi računa o radu na niskim i visokim temperaturama, različitim nadmorskim visinama, termičkom ciklusu, protiveksplozivnoj zaštiti ako se radi o mašini za HEV, opterećenjima na vratilu, udarima, vibracijama, delovanju soli, hemikalija i stranih tela na semeringe i druge delove motora. Kakva mora da bude konstrukcija motora s obzirom na pojedine uticaje okruženja biće detaljnije navedeno u glavi 7.

Da bi se ilustrovalo koliko je značajno obratiti pažnju na robusnost konstrukcije motora, ovde će biti pobrojana štetna dejstva niskih temperatura na motore. Koliko je teško napraviti motor odgovarajuće konstrukcije govori i činjenica da se vučni motor mora projektovati prema oprečnim zahtevima, pošto mora da radi i pri ekstremno niskim i pri ekstremno visokim temperaturama.

Pri niskim temperaturama se zgušnjavaju maziva u ležajima motora. Ovo doprinosi povećanju mehaničkih gubitaka. Kod EV se, osim ovog efekta na samom motoru, povećavaju otpori vuče usled snega i leda koji se nahvata na pod i blatobrane vozila. U /36/ je naveden podatak da je povećanje otpora vuče u jednoj takvoj situaciji iznosilo 100% pri čemu je uračunat i gubitak snage na zagrevanje akumulatora.

Delovi motora i izolacije su na izuzetno niskim temperaturama podložni pucanju usled pojave udarnih opterećenja. Ovo se naročito odnosi na delove magnetnog kola. U slučaju pokretanja motora u takvim uslovima dolazi do zagrevanja pojedinih delova (namotaja) i nejednakog širenja usled povećanja temperature. Ovo takođe dovodi do lomova u motoru. Treći problem je sniženje otpora izolacije usled njene higroskopnosti, ali on nije preterano kritičan kada se radi o savremenim izolacijama i niskim naponima na kojima rade motori EV.

Kod motora sa malim vazдушnim zazorom može da dođe i do ukočenja rotora usled smrzavanja kondenzovane vodene pare u zazoru. Usled toga treba konstruisati motore sa što većim zazorom. Kod motora sa stalnim magnetima se usled niskih temperatura javlja privremeno ili stalno razmagnetisanje.

3.2 Generatori i pomoćni motori

Najvažnija svojstva generatora za HEV i pomoćnih motora za EV i HEV su njihova velika efikasnost i mala težina. Samim tim su to uglavnom mašine za velike brzine. Osim ovih svojstava generatori i pomoćni motori moraju da budu robusni i da ne zahtevaju posebno održavanje.

3.2.1 Generatori za HEV

Izbor generatora za HEV je značajno jednostavniji nego izbor vučnih motora. Pri tome se misli na serijska HEV jer se kod paralelnih izbor motor/generatora vrši na način opisan u 3.1.1. Serijski HEV su osmišljeni tako da pri kretanju vozila konstantnom nominalnom brzinom po putu čiji je nagib oko 3%, celokupnu snagu obezbeđuje toplotna mašina preko generatora i vučnog motora. Višak snage motora treba da obezbedi lagano dopunjavanje baterija. Njegov proračun izlazi iz okvira ovog rada, a procenjena vrednost od 10% je već pomenuta. Generator će, dakle, imati snagu koja je nešto veća od snage potrebne za savladavanje stalnih otpora vuče. Na primer, uz EV opisano u /36/ korišćena je prikolica za povećanje radijusa kretanja sa generatorom snage 17 kW , dok snaga vučnog motora iznosi 150 kW . Relacija (3.6) je dobijena preuređenjem relacije (3.2) i množenjem sa brzinom što je u skladu sa (2.1). Uz to je zanemarena brzina čeonog vetra jer ta veličina nema suštinski značaj. Sve oznake imaju isto značenje.

$$P_g \approx 1.1 \cdot \left(m \cdot g \cdot (\mu + \sin \alpha) \cdot v + \frac{\rho \cdot C_w \cdot A}{2} \cdot v^3 \right) \quad (3.6)$$

Zahtev da generator ima veliki koeficijent korisnog dejstva, malu masu i dimenzije lako je ispuniti korišćenjem generatora sa permanentnim (stalnim) magnetom (PM). Znatno je teže zadovoljiti zahtev za velikom brzinom obrtanja mašine jer se u tim uslovima javljaju velike centrifugalne sile.

Regulacija napona napajanja obavlja se posebnim DC-DC ili AC-DC pretvaračima tako da se ne mora posebno kontrolisati brzina generatora. Generatori imaju još jednu ulogu. To je uloga startera pri pokretanju toplotnih mašina. Pošto je u toku uobičajene vožnje HEV potrebno višestruko startovanje toplotne mašine (jer se ona gasi kada se napune baterije) ovu ulogu generatora ne treba zanemariti. Da bi se ostvarilo brzo pokretanje toplotne mašine potrebno je da generator u motorskom režimu ima dobar polazni momenat kako bi se za kratko vreme postigla radna brzina toplotne mašine /12/.

Generatori koje pokreću dizel motori su generatori malih brzina. Ove mašine se optimizuju na drugačiji način, ali sa istim ciljem – da imaju maksimalan stepen korisnog dejstva i minimalnu težinu i dimezije.

3.2.2 Pomoćni motori

Pomoćni motori u EV mogu da imaju veoma značajnu ulogu i prilično veliku snagu. Vitalni pomoćni pogoni su pogoni servo upravljača i kočnica i sistema za hlađenje motora i energetskih pretvarača. Manje vitalan pogon, ali pogon veće snage od navedenih, je pogon kompresora erkondišna.

U /3/ se kao primer pomoćnog pogona navodi pogon servo upravljača. Njegova snaga je 900W. Radi se o pogonu promenljive brzine sa trofaznim asinhronim motorom kojim se upravlja po U/f zakonitosti. Da bi se smanjila potrošnja energije, a da se pri tom ne naruše dinamičke osobine pogona primenjuje se PID kontroler u regulacionoj petlji po pritisku koji po potrebi brzo podiže učestanost i napon motora.

I od svih ostalih pomoćnih motora se očekuje da imaju slične radne karakteristike kako bi se povećao domet vozila. Na primer, upotrebom erkondišna domet se smanjuje od 20% do 30% /7/. Jedan takav motor koji je direktno povezan sa kompresorom erkondišna prikazan je na Sl. 13. Direktnim pogonom se postižu dodatne uštede jer nema gubitaka na prenosnom mehanizmu kao što je uobičajeni remen /21/.



Sl. 13. Asinhroni motor i kompresor erkondišna

4. VUČNI MOTORI

Iako jedna od nekoliko najdinamičnijih oblasti elektroenergetike, oblast konstruisanja mašina za EV i HEV ne donosi fundamentalne novosti. Jedno je sigurno, da motor jednosmerne struje odlazi u muzej, odnosno da nema nikakvu perspektivu u vuči EV. Svi ostali motori su u suštini mašine naizmenične struje čiji se principi rada zasnivaju na principima koje je Nikola Tesla opisao u svom patentu iz 1878. godine /22/. Novosti nastaju samo u pojedinim konstrukcijskim detaljima, primenjenim materijalima, načinu napajanja i upravljanja tim motorima. U geometriji motora, odnosno magnetnog kola došlo je do značajnih pogona kao i u primeni računara u projektovanju (CAD – Computer Aided Design) motora i zahvaljujući tome do bolje optimizacije svih elemenata motora /3/.

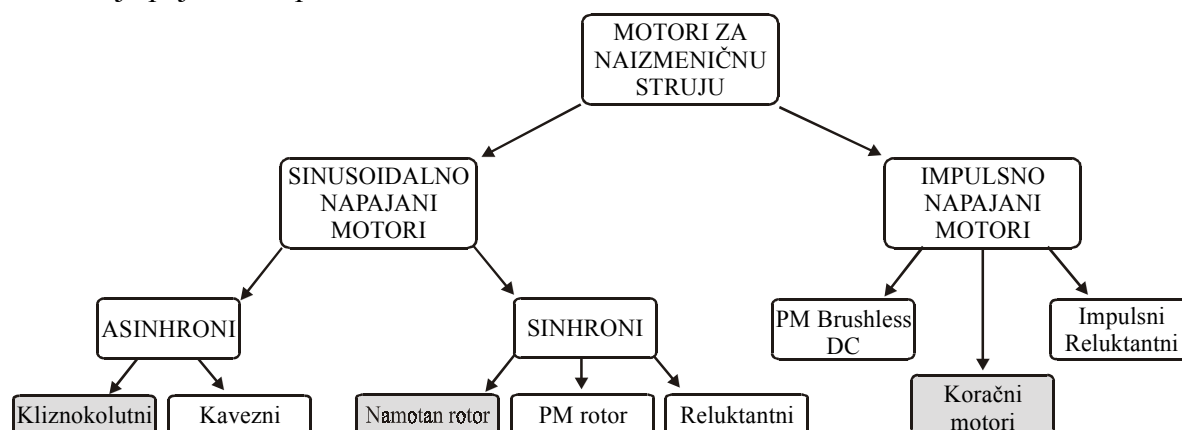
Motori jednosmerne struje su kroz istoriju bili neprikosnoveni kao vućni motori. Razlog je taj što je njihovu brzinu bilo znatno lakše kontrolisati nego brzinu motora za naizmeničnu struju. Drugi razlog je taj što je prirodna karakteristika rednih motora jednosmerne struje imala idealan oblik za primenu u električnoj vuči. I danas su ovi motori prisutni kako u električnoj vuči tako i u EV i HEV. Međutim, njihovo vreme je prošlo i svi veliki proizvođači automobila se okreću motorima naizmenične struje. Komutatorski motori jednosmerne struje mogu se naći u ponudi za prepravku standardnih vozila u EV ili HEV i nigde više. U /3/ se navode pojedini modeli Daihatsu-a, Mazda-e i Fiat-a kao modeli koji još uvek koriste komutatorske motore jednosmerne struje, ali su to eksperimentalna vozila koja se neće još dugo proizvoditi ili su prestala da se proizvode.

U /16/ su upoređeni komutatorski motori jednosmerne struje sa dva modela motora naizmenične struje. Pokazuje se da su komutatorski motori teži od naizmeničnih motora iste snage, brzina im se menja u užem opsegu pa se ne može izbeći menjač stepena prenosa u transmisiji, a da se pri tome ne pokvari efikasnost. Ostali nedostaci komutatorskih motora u odnosu na motore naizmenične struje su manji stepen korisnog dejstva i veća cena. Možda najvažniji nedostatak motora jednosmerne struje u odnosu na motore za naizmeničnu struju je postojanje kolektora i četkica i potreba za njihovim održavanjem. Kolektor i četkice su razlog što je ograničen opseg brzina ovih motora, a u /28/ se ističe i da je varničenje na kolektoru opasnost sa stanovišta bezbednosti, pogotovu za primenu u HEV.

Jedina prednost motora jednosmerne struje je jednostavan pretvarač energetske elektronike. Navodi se da je ukupna cena motora i pretvarača niža za motor jednosmerne struje, ali se odnos tih cena menja. U /23/ se navode podaci o trendu pada cena pretvarača u odnosu na cenu motora. U 1980. godini pretvarač je bio 9 puta skuplji od motora, da bi se 1995. taj odnos sveo na 5. Za 2000. godinu se predviđalo da će taj odnos biti 2:1 što bi trebalo utvrditi ispitivanjem tržišta. Uskoro se može očekivati da se cena pretvarača izjednači sa cenom motora pa da i ta, poslednja, prednost jednosmernih motora bude izgubljena.

Svi razlozi koji su do sada izneti uticali su na to da se u nastavku rada ne analiziraju motori jednosmerne struje. Podela gotovo svih električnih mašina data je u /3/. Ovde je na Sl.14. prikazana samo podela mašina naizmenične struje. U tom radu se za motore jednosmerne struje koristi naziv “komutatorski”, a za motore naizmenične struje naziv “beskomutatorski”. Ovakvi nazivi možda i jesu precizniji od naziva koji su u tekstu upotrebljeni, ali ovi drugi bolje opisuju prirodu tih mašina. Usvajanjem ove terminologije dolazi i do pomalo paradoksalnih situacija da se *PM brushless DC* (motor jednosmerne struje sa stalnim magnetom bez četkica) svrstava u motore naizmenične struje. Kroz namotaje ovog motora zaista teče struja promenljivog smera pa je time usvojena nomenklatura i opravdana.

Zbog toga što se uobičajeno uz srpske termine koriste i engleski nazivi pojedinih mašina, a za neke i ne postoje odgovarajući prevodi, u ovom tekstu će se koristiti engleske skraćenice za označavanje pojedinih tipova motora.



Sl. 14. Podela motora za naizmeničnu struju (osenačeni su motori koji se, prema dostupnoj literaturi, ne koriste ili se iznimno koriste kao vučni motori za EV i HEV)

4.1 Asinhroni motori

Konstrukcija i svojstva asinhronih motora su dobro poznati jer se ovi motori izučavaju u svakom kursu iz električnih mašina. Najveći broj i najveća instalisana snaga elektromotornih pogona sa stalnom brzinom je upravo izvedena sa asinhronim motorom. Ovaj motor je jednostavniji, laganiji, efikasniji i robusniji od motora jednosmerne struje. Prema podacima iz /16/ asinhroni motor ima 2 do 3 puta nižu cenu od motora jednosmerne struje. Maksimalna

brzina je veća za 50% do 150% od maksimalne brzine motora jednosmerne struje koja je ograničena zbog problema sa komutacijom. Efikasnost asinhronog motora je veća nego kod jednosmernih motora i iznosi 95% do 97%, za razliku od 85% do 89% za jednosmerne motore. Ono što posebno preporučuje asinhroni motor za upotrebu u EV je činjenica da je njegova efikasnost gotovo jednaka i u slučaju delimičnog opterećenja i iznosi 93% do 94% pri opterećenju od svega 10%, dok kod motora jednosmerne struje stepen korisnog dejstva iznosi svega 80 do 87% u tom području rada.

Problem sa upotrebom asinhronog motora u pogonima sa promenljivom brzinom je složena regulacija njegove brzine. Da bi se regulisala brzina ovog motora neophodno je menjati učestanost napona napajanja. Napredovanjem energetske elektronike došlo se do momenta kada je to moguće izvesti veoma efikasno pomoću invertora. Danas se asinhroni motor može pronaći u svim elektromotornim pogonima, pa čak i u onim visokih performansi. Tome je doprineo razvoj mikrokontrolera koji omogućuju implementaciju algoritama za vektorsko upravljanje asinhronog motora. Kao vučni motor ovaj tip motora je u električnoj željeznici istisnuo sve ostale motore. Svi proizvođači lokomotiva za brze vozove ugrađuju asinhronu vučnu motore. I proizvođači EV i HEV su kod mnogih modela primenili ove motore. Na Sl. 15. su prikazani vučni asinhroni motor iz [18] kao i EV istog proizvođača.



Sl 15. Asinhroni vučni motor i automobil *Solectria Sunrise* proizvođača *Solectria Corporation*

Kao vučni motor po pravilu se koristi kavezni asinhroni motor. Klizno-kolutni motori se ne koriste da bi se izbegla upotreba četkica i kliznih prstenova, a i zbog toga što je njihova upotreba postala besmislena zahvaljujući primeni modernih energetske pretvarača i kontrolne elektronike. Principi upravljanja će biti ukratko opisani nešto kasnije u tekstu. Da bi se dobile što bolje performanse i izdržljivost, kavez vučnih asinhronih motora se uglavnom izrađuje od specijalnih legura bakra, a ne od aluminijuma kao kod standardnih motora.

Princip rada asinhronog motora je dobro poznat pa će ovde biti samo ukratko opisan. Napajanje asinhronog motora je višefazno. Namotaji pojedinih faza su prostorno pomereni u statoru motora, a fazni naponi su fazno (vremenski) pomereni. Kada se zatvori strujno kolo fazno pomerene struje koje se uspostavljaju u prostorno pomerenim namotajima uspostavljaju Teslino obrtno magnetno polje koje se, za idealnu raspodelu magnetopobudne sile jednog namotaja po obodu mašine, opisuje magnetopobudnom silom datom jednačinom (4.1) [24].

$$f(\theta, t) = \frac{3}{2} \cdot A \cdot I_m \cdot \cos(\omega \cdot t - \theta) \quad (4.1)$$

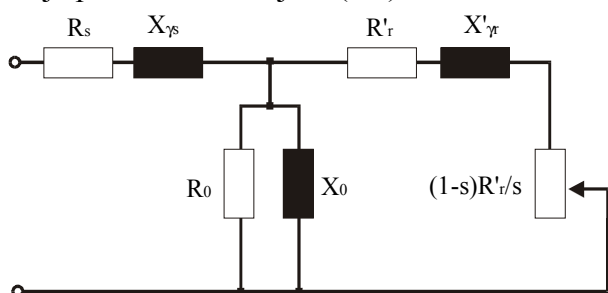
Očigledno je da maksimum magnetopobudne sile putuje duž oboda asinhronu mašine brzinom ω . Ako se rotor pri tome ne kreće, u njegovim namotajima, odnosno šipkama kaveza, će se indukovati elektromotorna sila koja dovodi do uspostavljanja struje. Čim se uspostavi

struja u rotoru ona stvara obrtno magnetno polje rotora. Ova dva obrtna magnetna polja su međusobno spregnuta i kreću se istom, sinhronom, brzinom u odnosu na nepomične namotaje statora. Da bi se uspostavilo magnetno polje rotora neophodno je da se obrtno magnetno polje statora kreće u odnosu na rotor. Ako bi se rotor kretao sinhrono sa obrtnim magnetnim poljem, u njemu se ne bi indukovao napon tako da bi došlo do nestanka polja rotora i raskidanja veze sa poljem statora.

Očigledno je da je osnova rada asinhronog motora elektromagnetna indukcija napona u namotajima rotora, a uslov za to je relativno kretanje obrtnog polja statora u odnosu na rotor. Ova razlika između brzine obrtnog magnetnog polja statora i mehaničke brzine rotora jednaka je relativnoj brzini polja rotora (brzini obrtnog polja u odnosu na rotor). Relativna brzina kretanja polja rotora karakteriše se bezdimenzionom veličinom koja se zove klizanje, a definisana je relacijom (4.2) /25/.

$$s = \frac{\omega_r}{\omega_s} = 1 - \frac{\omega}{\omega_s} \quad (4.2)$$

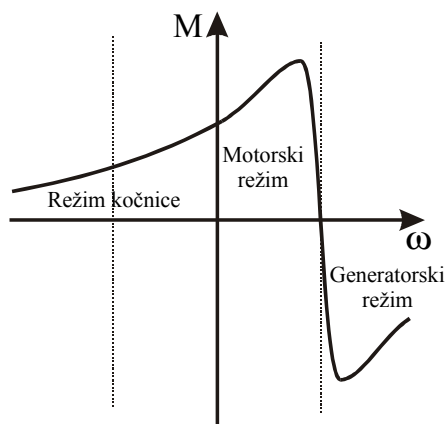
U prethodnoj relaciji sa ω_r je označena relativna brzina polja rotora, ω_s je sinhrona brzina (brzina obrtnog polja u odnosu na stator) i ω je brzina obrtanja rotora. Ekvivalentna šema asinhronog motora prikazana je na Sl. 16., a mehanička karakteristika na Sl. 17. Momentna jednačina je prikazana relacijom (4.3).



Sl. 16. Ekvivalentna šema asinhronog motora i njegov poprečni presek

$$m_e = \frac{q_s}{\omega_s} \cdot \frac{U_s^2 \cdot \frac{R'_r}{s}}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_s + X'_r)^2} \quad (4.3)$$

U relaciji su upotrebljene sledeće oznake: m_e - moment motora, q_s - broj faza statora, ω_s - sinhrona brzina, U_s - efektivna vrednost faznog napona, R_s - otpor namotaja statora, R'_r - otpor rotorskog namotaja sveden na stator, X_s - reaktansa statora, X'_r - reaktansa rotora svedena na stator.



Sl. 17. Mehanička karakteristika

Mehanička karakteristika asinhronog motora, očigledno, ne liči na karakteristiku sa Sl. 7, koja je potrebna da bi motor mogao da se koristi kao vučni motor. Da bi asinhroni motor radio kao vučni neophodno je primeniti neki od metoda upravljanja kako bi se dobila željena vučna karakteristika.

Upravljanje momentom i brzinom asinhronog motora je veoma složeno zbog toga što ova mašina nema odvojene priključke za pobudnu i struju opterećenja. Ovaj problem je najlakše razumeti na osnovu sledećeg primera. Ako je potrebno da motor jednosmerne struje radi u oblasti slabljenja polja, tj. sa brzinom većom od nominalne, snizi se pobudni napon. I u tim uslovima motor jednosmerne struje može da razvija nominalni moment. Kod asinhronog motora slabljenje polja nije moguće ostvariti snižavanjem napona jer se vrednost prevalnog momenta smanjuje sa kvadratom napona tako da se lako može desiti da se motor zaustavi kada moment opterećenja premaši tu, sniženu, vrednost prevalnog momenta.

Da bi se promenila brzina asinhronog motora neophodno je promeniti učestanost napona napajanja. Uz pretpostavku da se nije promenio moment opterećenja i da je fluks u mašini ostao konstantan i klizanje će ostati nepromenjeno. Najjednostavniji metod kojim se to ostvaruje je skalarna ili U/f regulacija. Ideja je da se sa smanjenjem učestanosti proporcionalno smanjuje i napon na motoru čime se održava konstantan fluks. Ovakav metod ne dopušta direktno upravljanje momentom jer bi za upravljanje momentom bilo neophodno da se menja klizanje motora (Sl. 17.), a na njega se ne može direktno uticati. Ovakvo upravljanje ni izdaleka ne zadovoljava potrebe vučnog motora za EV jer se za tu primenu zahteva precizna kontrola momenta mašine u svim režimima. Režim rada vučnog motora u kojem posebno do izražaja dolazi potreba za upravljanje momentom je ubrzavanje. Kod U/f regulacije se momentom uopšte ne upravlja već je on određen karakteristikama opterećenja. To znači da je prilikom ubrzavanja momenat neupravljiv i neodređen jer je kočioni moment manji od momenta motora.

Drugi nedostatak ovakvog upravljanja je nemogućnost da se, kada je opterećenje mašine smanjeno, smanji vrednost fluksa u mašini i da se na taj način ostvare uštede energije. Ove uštede nastaju na račun smanjenja struje magnećenja i gubitaka koji su povezani sa magnetnim poljem u mašini. U [7] se može naći podatak da se korišćenjem maksimalne kontrole efikasnosti povećava radijus kretanja EV za 10 do 20%. Danas su veoma intenzivna istraživanja kojima je cilj minimizacija gubitaka u motoru smanjenjem intenziteta polja. Ta tema prevazilazi okvire ovog rada pa dalje neće biti razmatrana.

Svi postavljeni zahtevi se mogu zadovoljiti vektorskim upravljanjem. Pošto bi detaljno razmatranje principa vektorskog upravljanja predstavljalo isuviše veliku digresiju ovde će biti izložena samo ideja i najvažniji zaključci u vezi sa vektorskim upravljanjem na osnovu [25].

Ideja vektorskog upravljanja je da se nezavisno, kontrolom jedne komponente struja, upravlja poljem mašine, a drugom komponentom se kontroliše momenat. Na ovaj način asinhroni motor postaje jednako pogodan za upravljanje kao što je to slučaj sa motorima jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom. Da bi se to moglo ostvariti, mašinu je neophodno posmatrati u prostoru stanja. Prostor stanja čini dobro poznati model mašine u području sinhrono rotirajućih osa. U tom sistemu su sve ulazne, izlazne veličine i promenljive stanja svedene na dve ose. Jedna osa se poklapa sa vektorom polja, a druga je normalna na nju. Samo ona komponenta struje statora koja je upravna na fluks rotora učestvuje u stvaranju momenta prema relaciji (4.4).

$$m = \frac{M}{L_r} \cdot i_{sq} \cdot \Psi_{rd} \quad (4.4)$$

Oznake su: m – moment na vratilu motora, M – međuinuktivnost, L_r – induktivnost rotora, i_{sq} – q komponenta statorske struje, Ψ_{rd} – d komponenta rotorskog fluksa.

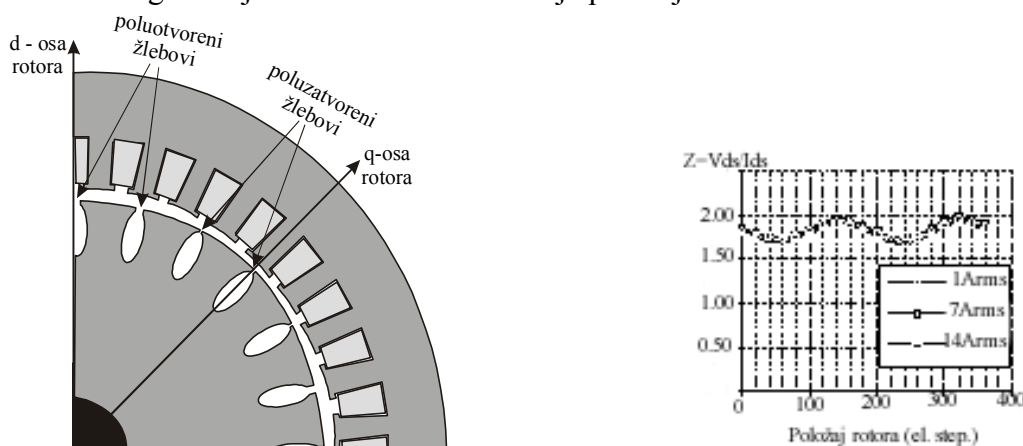
Drugom komponentom statorske struje se kontroliše polje u mašini prema relaciji (4.5), a uz uslov da je podužna komponenta polja jednaka nuli.

$$\psi_{rd} = \frac{M}{1 + p \cdot T_r} \cdot i_{sd} \quad (4.5)$$

Sve ove relacije i veličine su veličine u prostoru stanja. Transformacije u prostor stanja se lako ostvaruju u mikrokontrolerima. U realnom području ovo odgovara, ne samo promeni fluksa i učestanosti napona napajanja, već i njegovog faznog stava. Da bi se u mikrokontroleru izvršile sve potrebne transformacije (iz realnog u domen prostora stanja u kojem se vrši regulacija, a zatim nazad u vremenski domen) neophodno je imati tačnu informaciju o trenutnom položaju vektora fluksa.

U okviru 3.1.4 je objašnjeno kakvi se sve problemi javljaju prilikom primene senzora položaja fluksa ili položaja i brzine rotora. Zbog velikog intenziteta vibracija u EV, kao i zbog potrebe da se obezbede pouzdane veze davača i kontrolera i zbog potrebe da se to ostvari sa što manjim dodatnim teretom za mehaničku zaštitu provodnika, potrebno je primeniti neki od *sensorless* metoda² vektorskog upravljanja. Od ovih metoda se očekuje izuzetna robusnost.

Asinhroni motori nisu najpogodnije mašine sa aspekta stvaranja signala potrebnih za rekonstrukciju položaja polja na osnovu metoda iz /20/. Razlog za to je nepostojanje isturenosti polova rotora i statora. Da bi se prevazišao taj problem u /20/ je predloženo da se pri konstrukciji motora naprave zupci i otvori žlebova različite širine. Ovo je prikazano na Sl. 18. gde je prikazan i grafik promene reaktanse rasipanja sa položajem rotora. Ovakva izmena u konstrukciji ne unosi prevelike oscilacije u momenat motora kao što to ne čini ni injektovani visokofrekventni signal koji se koristi za određivanje položaja rotora.

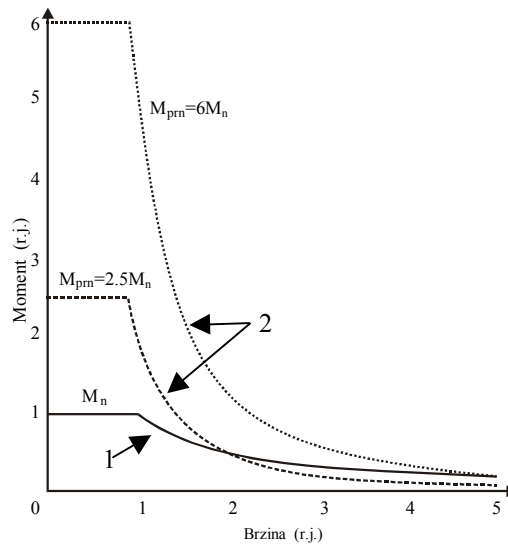


Sl. 18. Izmjena konstrukcije zubaca i žlebova asinhronog motora za *sensorless* pogon i grafik promene reaktanse sa položajem rotora takvog motora

Momenat regulisanog asinhronog motora može da ima bilo koju vrednost unutar anvelope sa Sl. 19. Njegova vrednost menja se sa kvadratom napona (prema (4.3)), a napon se menja sa učestanošću, odnosno brzinom, da bi se kontrolisao fluks u mašini. Pored toga što zavisi od napona, moment mašine zavisi od klizanja. Teorijski, da bi se obezbedio rad u području konstantne snage potrebno je menjati napon motora po (4.6) /13/. Tada bi klizanje bilo konstantno. Budući da je vrednost napona ograničena i konstrukcijom motora i naponom primenjenih akumulatora, ovaj radni režim se realno ostvaruje pri konstantnom naponu, ali uz povećanje klizanja. Primer takve regulacije je obrađen u /26/ i odgovara grafiku sa Sl. 19.

² *Sensorless* metode se zasnivaju na upravljanju bez upotrebe davača brzine i položaja rotora, odnosno koriste se samo informacije o strujama i naponima napajanja.

$$U = const. \cdot \sqrt{\frac{f}{f_n}} \quad (4.6)$$



Sl. 19. Anvelope momenata regulisanog pogona, 1-pogonska karakteristika, 2-prirodna karakteristika

Na Sl. 19. su označene prirodna i pogonska karakteristika motora, poštujući nomenklaturu iz /4/. U /26/ se prirodna karakteristika naziva tranzijentom eksploatacionom karakteristikom, a pogonska se naziva radnom eksploatacionom karakteristikom. Prva odgovara maksimalnim (prevalnim) vrednostima momenta koji se može dobiti na vratilu mašine, a druga je anvelopa nominalnih momenata mašine pri promeni učestanosti napajanja, odnosno brzine mašine. Tranzijentna ili prirodna karakteristika predstavlja apsolutnu granicu momenata. Veći moment od momenta sa prirodne karakteristike se ne može dobiti. Mašina opterećena nominalnim momentom može trajno da radi sa tim opterećenjem. Nominalni moment se u području konstantne snage menja obrnuto srazmerno sa učestanošću, a prevalni moment se menja srazmerno kvadratu učestanosti /26/. Ovo je prikazano relacijama (4.7) i (4.8).

$$m_n \sim \frac{1}{\omega} \quad (4.7)$$

$$m_{pr} \sim \frac{1}{\omega^2} \quad (4.8)$$

Da bi se promena nazivnog momenta odvijala po relaciji (4.7) potrebno je da napon, odnosno struja magnećenja, budu konstantni kako bi se obezbedio konstantan fluks u mašini. Istovremeno je potrebno obezbediti da se nominalna vrednost struje ne premaši kako ne bi došlo do pregrevanja mašine. Mehanizam po kojem se to dešava je povećanje klizanja.

Očigledno je da mašina može da se tereti nazivnim momentom do kritične brzine ω_k , dok se ne preseku prirodna i eksploataciona karakteristika. Tačka preseka odgovara radu mašine sa nominalnim momentom pri prevalnom klizanju. Dalje povećanje brzine je moguće samo ukoliko se obezbedi stabilan rad mašine na prevalnom klizanju i ukoliko je opterećenje mašine manje od opterećenja datog prirodnom karakteristikom.

U /26/ je pokazano da je odnos kritične i nazivne brzine jednak odnosu nazivnog i prevalnog momenta. Ovo je prikazano relacijom (4.9).

$$\omega_k = \frac{m_{pr}}{m_n} \cdot \omega_n \quad (4.9)$$

Specifičnosti konstrukcije vučnih asinhronih motora osim povećane robusnosti i efikasnosti koje su implicitno pomenute kroz napomenu da su kavezi rotora izrađeni od specijalnih legura bakra umesto od aluminijuma, čine i brzinske karakteristike motora. Pošto se pretpostavlja upotreba u regulisanom pogonu onda je moguće postići rad po karakteristici datoj na Sl. 7. Takav rad podrazumeva veliki brzinski opseg motora. Motori su prvenstveno konstruisani za velike brzine iz već pomenutih razloga. Pored toga što je konstruisana za velike brzine, potrebno je da mašina bude konstruisana i za veliki odnos maksimalne i nominalne brzine kako bi se izbegla upotreba menjača stepena prenosa.

Maksimalna brzina motora je određena prvenstveno mehaničkom izdržljivošću rotora. Drugi kriterijum po kojem se određuje brzina je maksimalna učestanost napona napajanja koja je povezana sa povećanjem gubitaka u gvožđu, pa i u bakru usled skin efekta. Nominalna brzina je određena termičkim proračunom, odnosno to je ona brzina pri kojoj se ima maksimalan momenat motora pri nazivnom fluksu i pri kojem motor može trajno da radi.

Kada se konstruiše motor za električnu vuču onda te dve brzine moraju što više da se razlikuju, a uslov za to je da se što više razlikuju nominalna i kritična brzina. Ovo sa druge strane znači da vučni motori moraju da imaju veliki odnos nazivnog i prevalnog momenta (relacija (4.9)). U /4/ je navedeno da odnos prevalnog i nominalnog momenta (koeficijent preopteretljivosti) mora da se kreće do 5 kako bi se obezbedio rad sa minimalnom snagom. Mašine sa ovako velikim koeficijentom preopteretljivosti smatraju se specijalnim motorima. Oni se konstruišu sa malom vrednošću relativne struje magnećenja, odnosno sa malim količnikom jačine magnetne indukcije u zazoru i gustine ampernavojaka u mašini /35/.

Zbog mehaničke izdržljivosti se motori za velike brzine uobičajeno prave od punog magnetnog kola na rotoru. U /27/ je prikazana konstrukcija ultrabrzog (do 60.000 $1/min$) asinhronog motora za pogon kompresora. Pri njegovoj izradi je korišćen laminirani feromagnetni materijal za rotor, ali su pri tome sprovedeni posebni mehanički proračuni korišćenjem metode konačnih elemenata. Treba imati u vidu i da se radi o motoru snage ispod 2 kW koji je znatno lakše projektovati nego vučni motor od više desetina kW. U /27/ je detaljno objašnjen princip projektovanja ultrabrzog asinhronog motora, ali to izlazi iz okvira ovog rada.

Pored mehaničke izdržljivosti laminacija za brzohodne asinhronne motore koji se napajaju iz invertora mora da se odlikuje izuzetno malim specifičnim gubicima. Da bi se smanjili vrtložni gubici magnetno kolo se izrađuje od izuzetno tankih limovima (0.1 mm). Kao mogući materijali za izradu magnetnog kola u /31/ se pominju feromagnetne legure sa visokom vrednošću magnetne indukcije pri kojoj dolazi do njihovog zasićenja (za legure kobalta, vanadijuma i gvožđa 2.4 T) i amorfni feromagnetni materijali. Prvi se koriste za izradu magnetnih kola za mašine sa velikom specifičnom snagom, a drugi za dobijanje magnetnih kola sa izuzetno malim gubicima. Ovolika pažnja pri konstruisanju magnetnog kola je neophodna zbog velikog sadržaja viših harmonika u naponu napajanja /23, 27/.

U /28/ se pominje još jedna prednost kaveznog asinhronog motora nad klizno kolutnim. Ona je vezana za konstrukciju kaveznog rotora koja dopušta rad rotora na visokim temperaturama. Rad rotora na visokim temperaturama je moguć zbog toga što šipke kaveza nisu izolovane prema paketu limova. Neophodno je pri konstrukciji rotora kod koje se predviđa rad na visokim temperaturama povesti računa o spojevima šipki i kratkospojnih prstenova koji se moraju ojačati da ne bi došlo do njihovog pucanja usled pregrevanja. Prednosti konstrukcije motora sa povišenom temperaturom rotora se ogledaju u smanjenju gabarita mašine i povećanju specifične snage.

4.1.1 Broj faza asinhronog motora

Asinhroni motori u EV se napajaju iz invertora. Invertori se mogu konstruisati za proizvoljan broj faza tako da više nije nužno da asinhroni motor ima tri faze. Vučne motore je moguće konstruisati sa 2, 3 i više faza. Sudeći po dostupnoj literaturi trofazni motor dominira,

ako nije i jedini asinhroni motor koji se koristi u vuči, osim za izuzetno velike snage od 1 MW do 10 MW /38/. I pored toga ovde su ukratko analizirana alternativna rešenja.

Smanjenje broja faza ima svoje opravdanje u ceni pretvaračkih komponenti. Pošto je cena energetske pretvarača veća ili jednaka ceni motora onda se mora razmišljati o načinima da se ta cena umani. Jedan od načina je primena dvofaznog motora čime se eliminiše potreba za dva prekidačka elementa u invertoru. Alternativan pristup za smanjenje broja pretvaračkih komponenti je napajanje trofaznog motora iz nesimetričnih invertora. Sudeći po brzom napretku energetske elektronike i adekvatnom smanjenju cena elektronskih elemenata, može se pretpostaviti da ovakva rešenja neće zaživeti u budućnosti.

Povećanje broja faza ima za cilj da omogući konstruisanje motora većeg specifičnog momenta i specifične snage. Razlog zbog kojeg bi se povećao broj faza leži u činjenici da se pri povećanju faza za konverziju momenta pored osnovne komponente magnetopobudnih sila mogu koristiti i viši harmonici reda nižeg od broja faza. U /24/ su izvedeni analitički izrazi magnetopobudnih sila u zazoru mašine. Pokazano je da harmonici magnetopobudne sile mogu da rotiraju u smeru obrtnog magnetnog polja, suprotno od tog smera kao i da mogu da imaju brzine veće od osnovne brzine i brzine koje su manje od te brzine. Kakve će karakteristike imati pojedine komponente magnetopobudnih sila zavisi od prirode njihovog nastanka. Od karakteristika magnetopobudnih sila zavisi i to da li će one učestvovati u elektromagnetnoj konverziji ili neće.

Analiza momenta uz uvažavanje harmonika magnetopobudnih sila i za asinhroni motor može da bude urađena na način koji je opisan u /29/. Postupak se svodi na primenu modela mašine u prostoru stanja.

Povećanjem broja faza bi se postiglo dodatno smanjenje valovitosti momenta konverzije asinhronog motora /38/. Iako se asinhroni motor, zahvaljujući konstrukciji bez isturenih polova, odlikuje konstantnim momentom konverzije /28/ moguća je pojava valovitosti usled interakcije prostornih i vremenskih harmonika magnetomotornih sila. Ovo se obično javlja kod velikih vučnih jedinica gde se napajanje vrši pomoću tiristorskih invertora. Zbog male učestanosti invertora može doći do pojave značajnih parazitnih momenata. Za primenu u EV, obično je dovoljna zaštita to što se koriste visoke prekidačke učestanosti pa su i harmonici pomereni ka višim učestanostima. Budući da je tendencija da se svi elementi vozila dimenzionišu tako da imaju minimalnu masu, neophodno je povesti računa i o valovitosti momenata koja može da dovede do lomova tako dimenzionisanih vratila. Jedan metod za kompenzaciju vibracija opisan je u odeljku 6.3.

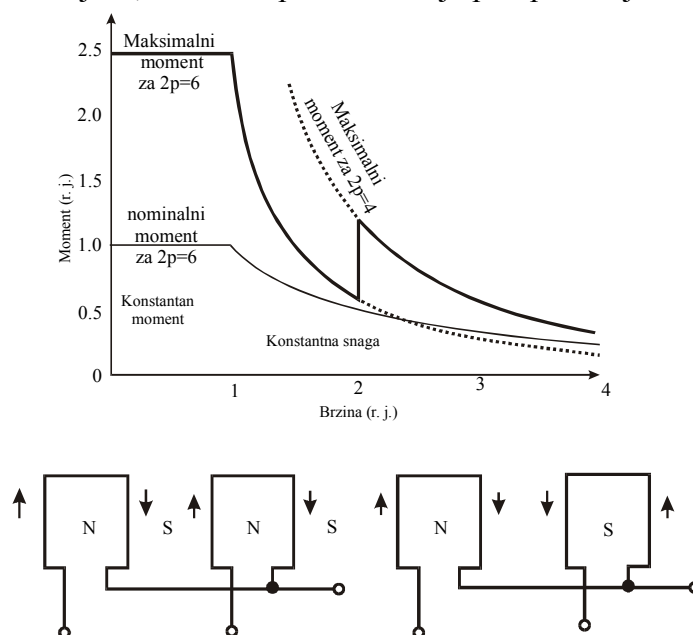
Povećanje broja faza dovodi do daljeg usložnjavanja invertora za napajanje. Činjenica da je magnetopobudna sila za q fazni motor u idealnom slučaju (bez viših harmonika) data izrazom (4.10), odnosno da je amplituda osnovne komponente magnetopobudne sile $q/2$ puta veća nego magnetopobudna sila jedne faze /24/, govori u prilog tome da je nominalna vrednost struje svakog od prekidača u invertoru manja nego za slučaj trofaznog motora. Cena prekidačkih komponenti nije linearna već se za određene vrednosti nazivnih struja i/ili snaga naglo povećava. Za svaki pojedinačan slučaj je potrebno izvršiti tehnoeкономsku analizu sa ciljem da se utvrdi da li je ukupna cena pogona sa višefaznim motorom viša ili niža od cene pogona sa trofaznim motorom.

$$f = \frac{q}{2} \cdot A \cdot I_m \cdot \cos(\omega \cdot t - \theta) \quad (4.10)$$

Detaljna analiza kojom bi trebalo da se utvrdi optimalan broj faza vučnog motora za pojedinačnu aplikaciju bi morala da obuhvati i analizu pouzdanosti. Veći broj komponenti nosi sa sobom veću verovatnoću otkaza. Pri tome se mora uvažiti i usložnjavanje upravljačkog

algoritma i upaljačkih kola sa povećanjem broja faza. U cenu takvog pogona sigurno ulazi i cena razvoja i izrade motora sa većim brojem faza.

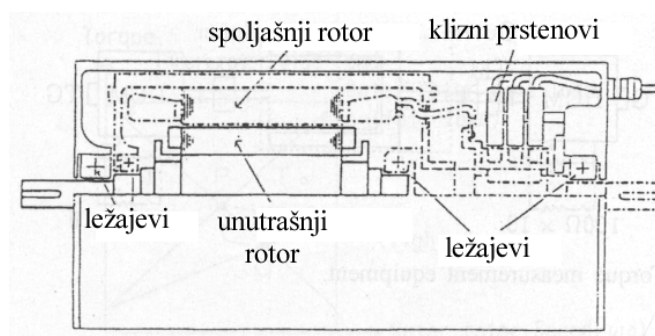
Još jedno, veoma zanimljivo i specifično rešenje je opisano u [7]. Radi se o pogonu sa šestofaznim invertorom i asinhronim motorom. Da bi se povećao opseg brzina za rad u području konstantne snage primenjuje se promena broja pari polova. Grafik sa Sl. 20. pokazuje mehaničku karakteristiku sa primenjenom promenom broja pari polova. Promena smeru struje kojom se realizuje promena broja pari polova se ostvaruje pomoću invertora tako da se upravljačko kolo ne usložnjava, a i brzina promene broja pari polova je dovoljno velika.



Sl. 20. Povećanje oblasti konstantne snage promenom broja pari polova šestofaznog motora

4.1.2 Asinhroni motor sa rotirajućim statorom (Anti-Directional-Twin-Rotary-Motor) - ADTR i dvostruko napajani Brushless motor

Da bi se realizovao pogonski sistem bez menjača stepena prenosa i bez diferencijala (Sl. 2b) moguće je primeniti mašine sa dva rotora koje će biti opisane u 4.5, ili ADTR motor kako je to predloženo u [30]. ADTR motor je prikazan na Sl. 21. On je konstruisan tako da se mogu obrtati i “stator” i rotor. Rotor je klasičan kavezni, a “stator”, odnosno spoljašnji rotor, se razlikuje od klasičnog po tome što je oslonjen na ležajeve i napaja se preko kliznih prstenova čime se omogućuje njegova rotacija.



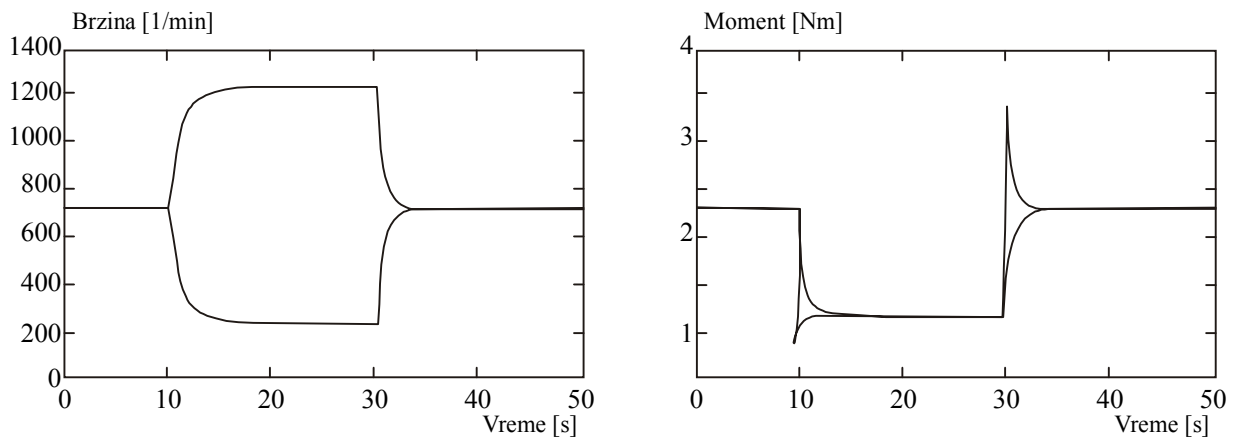
Sl. 21. ADTR motor

Kada se ovakav motor priključi na napajanje između statora i rotora se uspostavlja moment konverzije koji teži da zarotira spoljašnji i unutrašnji rotor u različitim smerovima. Da

bi se ovaj motor koristio u EV neophodno je ugraditi mehanički prenosnik koji menja smer obrtanja jednog od rotora. Ovakav prenosnik bi trebao da bude jednostavan, jeftin i kompaktan.

Prednosti ovog motora bi trebale da budu u njegovoj jednostavnoj konstrukciji. Zapravo, konstrukcija ovog motora se minimalno razlikuje od konstrukcije standardnog asinhronog motora pa bi troškovi proizvodnje trebali da budu sasvim mali. Za razliku od pogona kod kojih je transmisija eliminisana primenom motora u točkovima, ovde se ne povećava broj invertora i upravljačkih kola.

Na osnovu rezultata prikazanih u /30/ može se zaključiti da je predloženi motor pogodan za EV pošto se opterećenja pojedinih rotora po prirodi stvari balansiraju. Ovo dovodi do usporavanja jednog vratila i ubrzavanja drugog pri pojavi dodatnog opterećenja na jedno od njih. Ovo je prikazano na Sl. 22. Upravo takvu prenosnu karakteristiku treba da ima pogon sa diferencijalom da bi obezbedio prolazak automobila kroz krivinu.



Sl. 22. Brzine i momenti spoljašnjeg i unutrašnjeg rotora pri promeni opterećenja jednog od njih

Izvršene su analiza u stacionarnom stanju i u prelaznim režimima. Navedeno je kao značajan podatak da su električni parametri ovog motora gotovo identični sa parametrima klasičnog motora. Ovo dodatno pojačava tvrđenje da je pogon na osnovu ovog motora izuzetno jeftin jer se mogu koristiti i serijski kontrolni uređaji.

Kao cilj za buduća ispitivanja ADTR motora u radu se navodi da treba odrediti ukupne performanse ovog pogona u odnosu na druge izvedbe pogona i da treba optimizovati dizajn motora za električnu vuču. Dakle, ADTR se još uvek nalazi u fazi ispitivanja i ne može se dati njegova detaljna analiza u ovom trenutku.

Iako u dostupnoj literaturi nije navedeno da je razmatrana mogućnost primene dvostrano napajanog *brushless* (bezčetkičnog) motora u EV, njegova popularnost i zanimljiva struktura zaslužuju da se ovde ukratko pomene. Ovaj motor je, gotovo u svemu, konstruisan kao klasičan asinhroni motor. Jedina razlika je što poseduje dva trofazna statorska namotaja koji dele iste žlebove, i što šipke rotora nisu kratko spojene već su šipke grupisane u snopove (*nest* - gnezdo, snop) i spojene tako da formiraju petlje. Broj polova dva statorska namotaja mora da se razlikuje bar za 4, a broj snopova N_r i brzina rotora ω_r su dati relacijama ($\omega_{1,2}$ učestanosti namotaja 1, odnosno 2 i $p_{1,2}$ broj pari polova namotaja 1, odnosno 2) /44/:

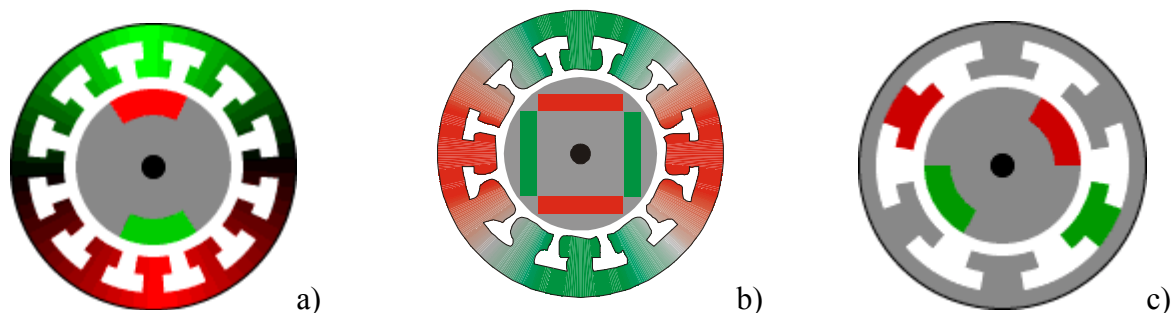
$$N_r = p_1 \pm p_2, \quad \omega_r = \frac{\omega_1 \pm \omega_2}{N_r} \quad (4.11)$$

Osnovna prednost je upravljanje pogonom pomoću invertora manje snage i to bez potrebe za kliznim prstenovima i četkicama. Promena brzine je moguća promenom učestanosti samo jednog od trofaznih sistema dok se drugi napaja konstantnom učestanošću.

4.2 Motori sa stalnim magnetima (*Permanent Magnet – PM*)

Motori sa PM za pobudu došli su do izražaja posle 1960. godine kada je pronađen visokoenergetski PM materijal $SmCo$. Dvadeset godina kasnije pojavio se i $NdFeB$ sa remanentnom magnetnom indukcijom od $1.4\ T$, koercitivnom silom od $1100\ kA/m$ i radnom temperaturom od $250^{\circ}C$ /31/. Motori kod kojih se koriste PM za pobudu zahvaljujući postojanju ovih materijala postaju atraktivniji od asinhronih motora za određene oblasti primene. Na njihovu popularnost utiče i stalno smanjenje cena PM na bazi retkih zemalja. Cena $NdFeB$ za primenu u serijskoj proizvodnji mašina je ispod 100\$ po kilogramu /31/.

Upotrebom PM dobijaju se visokoefikasne mašine sa izuzetno velikom specifičnom snagom. Razlog je taj što se ne koristi električno kolo za pobudu. Samim tim nema ni električnih gubitaka u tom kolu, a pošto se sinterovani materijali za izradu PM odlikuju malom specifičnom provodnošću nema ni gubitaka usled vrtložnih struja. Druga prednost je dobar dinamički odziv mašina usled visoke vrednosti fluksa u zazoru mašine. Zbog ovog svojstva se često ovakve mašine sreću u pogonima koji zahtevaju veliko ubrzanje /39/. Za takve pogone je neophodno dizajnirati mašine sa što većim odnosom momenta mašine prema momentu inercije. Rezultat su mašine velike dužine i malog prečnika /34/. Ne može se zanemariti ni činjenica da su mašine sa PM jednostavnije konstrukcije od mašina sa električnom pobudom /31/.



Sl. 23. Poprečni preseki različitih mašina sa PM: a) Sinhroni sa površinski montiranim PM, b) Sinhroni sa ugrađenim PM i c) BLDC sa površinski montiranim PM)

Na Sl. 23. su prikazane različite konstrukcije mašina sa stalnim magnetima. Prva podela mašina sa PM je na mašine sa ugrađenim PM i mašine sa površinski montiranim PM. Druga podela je na sinhronne mašine sa PM (PMSM) i bezčetkične (Brushless) mašine sa PM za jednosmernu struju (BLDC). Razlike u konstrukciji PMSM i BLDC mašina će biti objašnjene kasnije.

Mašine sa površinski montiranim PM nemaju isturenosti na rotoru. Samim tim moment ovih mašina ne osciluje u toku rada. Ovo se može dodatno poboljšati primenom namotaja koji se ne nalaze u žlebovima. Takva, *slotless*, konstrukcija se odlikuje boljom efikasnošću na višim brzinama i tišim radom, a konstrukcija sa žlebovima se odlikuje većim specifičnim momentom. Konstrukcijski problem kod mašina sa površinski montiranim PM jeste mehanička čvrstoća za rad sa velikim brzinama. Površinska montaža PM se obavlja pomoću specijalnih epoksidnih lepila.

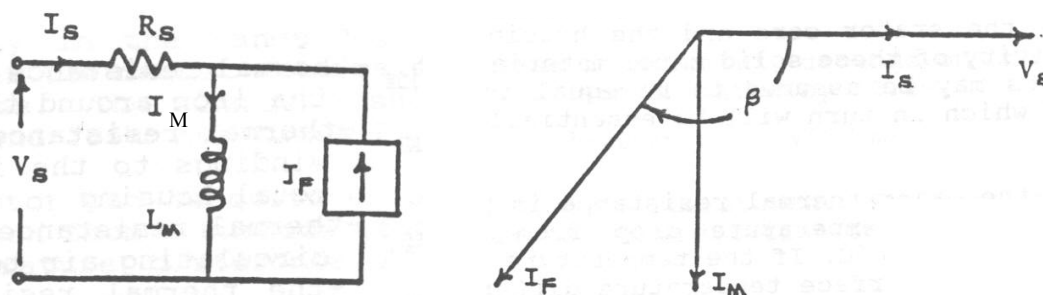
Klasični motori sa ugrađenim PM odlikuju se isturenošću rotora. Samim tim se javlja parazitna komponenta momenta što može da dovede do pojave vibracija, povećanja buke i povećanog mehaničkog naprezanja motora i prenosa mehanizma. Prednosti ove konstrukcije su veća mehanička čvrstoća rotora i lakša primena *sensorless* upravljanja po metodu predloženom u /20/ usled postojanja prostornih harmonika magnetnog fluksa. Zahvaljujući postojanju feromagnetnog materijala i magnetne isturenosti, odnosno reluktantnog fluksa, moguće je ostvariti režim konstantne snage u širokom opsegu brzina kod motora sa ugrađenim magnetima /28/. Strogo govoreći mašine sa ugrađenim PM spadaju u hibridne električne mašine. Pošto je doprinos reluktantnog momenta ukupnom momentu konverzije relativno mali,

uobičajeno je da se ove mašine izučavaju kao mašine sa PM. Izuzetno mašine sa PM ugrađenim u specijalan oblik rotorskih limova predložen u /40/ nemaju reluktantnu komponentu momenta. Stoga se one vrlo malo razlikuju u odnosu na mašine sa površinski montiranim PM i neće biti posebno analizirane.

Konstrukcija mašina velike specifične snage na osnovu PM je moguća i zahvaljujući tome što se pobuda - PM, uvek nalazi na rotoru. Budući da nema gubitaka u PM, rotor se ne zagreva intenzivno pa problem odvođenja toplote sa rotora nije izražen kao što je to slučaj sa ostalim mašinama. U mašinama sa PM gubici i intenzivno zagrevanje se javljaju na statoru gde odvođenje toplote nije teško rešiti.

Oblast konstantne snage je ograničena na relativno mali brzinski opseg što je osnovni nedostatak mašina sa PM. Postojanje velike magnetne indukcije u zazoru mašine je uzrok što je slabljenje polja teško ostvarivo. Ovaj problem će biti objašnjen na osnovu uprošćenog ekvivalentnog kola sinhronne mašine sa PM prikazanog na Sl. 24. Iako se ekvivalentno kolo i relacije odnose na PMSM, kvalitativni zaključci do kojih se dolazi važe i za BLDC.

Eksplotacija sinhronih mašina sa PM kao i BLDC se odlikuje radom sa jediničnim faktorom snage čime se omogućava upotreba invertora manje snage /34/. Za rad pri $\cos\varphi=1$ nacrtan je fazorski dijagram na Sl.24. PM rotora predstavljen je strujnim izvorom na ekvivalentnoj šemi. Struja I_F je takvog intenziteta da pri radu mašine u generatorskom praznom hodu pri nominalnoj brzini napon na priključcima bude jednak nominalnom. Ova vrednost struje je konstantna u svim režimima rada.



Sl. 24. Uprošćeno ekvivalentno kolo mašine i fazorski dijagram za $\cos\varphi=1$

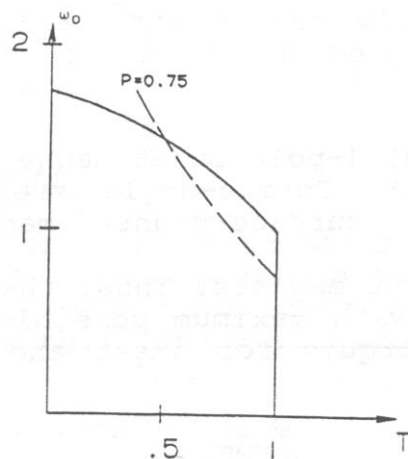
Ako se zanemari otpor statora onda očigledno važi relacija (4.12). Pošto za moment motora sa PM važi relacija (4.13) očigledno je da za isti moment opterećenja na vratilu napon motora mora da raste sa brzinom vrtila pošto je I_F konstantna struja, a I_s mora da bude konstantna da bi se održao konstantan moment. Iz izraza (4.13) je očigledno da se moment mašine menja promenom ugla β i napona U_s . Ugao β je ugao između ose magnetnog polja rotora i magnetnog polja statora za slučaj rada mašine sa jediničnim faktorom snage.

$$U_s \approx \omega_s \cdot L_m \cdot \sqrt{I_s^2 + I_F^2} \quad (4.12)$$

$$m_e = L_m \cdot I_F \cdot I_s \cdot \sin \beta \text{ [r.j.]} \quad (4.13)$$

Maksimalan moment se ostvaruje za ugao β od 90° . Konstantan momenat motora pri različitim brzinama se obezbeđuje povećavanjem napona napajanja i održavanjem ugla β na 90° sve dok se ne dostigne maksimalan napon statora. Dalje povećanje brzine praćeno je naglim smanjenjem struje I_s i momenta mašine pošto dolazi do izjednačenja napona napajanja i kontra ems. Da bi se omogućio rad u oblasti slabljenja polja (pri konstantnom naponu), mašinom se upravlja tako da se uspostavi komponenta struje statora koja delimično poništava polje PM. Ovo odgovara povećanju ugla β i smanjenju faktora snage. Ovakav radni režim je nestabilan što se može videti i sa momentnih karakteristika iz 4.2.1, ali je moguć zahvaljujući upravljačkim algoritmima.

Anvelopa momentnih karakteristika je prikazana na Sl. 25. Rad u režimu konstantne snage je ograničen vrednošću induktivnosti magnećenja sa ekvivalentne šeme. Za tipičnu konstrukciju sa površinski montiranim magnetima odnos maksimalne i minimalne brzine je manji od 2 (u primeru iz /69/ on iznosi svega 1.2) što ne odgovara za primenu u električnoj vuči (pokazano u 3.1.1). Maksimalna brzina motora sa PM u oblasti konstantne snage računa se po relaciji (4.14) /34/. Da bi maksimalna brzina motora bila što veća neophodno je smanjiti snagu mašine (prirodna karakteristika). Zahvaljujući većoj vrednosti L_m , mašine sa ugrađenim magnetima imaju veću maksimalnu brzinu u oblasti konstantne snage.



Sl. 25. Maksimalni momenti motora sa PM

$$\omega_{\max} = \frac{V_{\max}}{1 - L_m \cdot I_s} [r.j.] \quad (4.14)$$

Povećanje opsega brzina u oblasti slabljenja polja moguće je postići na nekoliko načina. Osnovni način je slabljenje polja njegovim poništavanjem pomoću statorsche struje. Ovo dovodi do povećanja gubitaka u mašini i samim tim do smanjenja njene efikasnosti, a efikasnost je takođe bitna za primenu u EV i HEV. Druga mogućnost je opisana u /7/. Suština je da se invertorom upravlja tako da se dobije negativna vrednost reluktantnog fluksa (srazmeran sa di/dt) kod mašine sa ugrađenim magnetima. Postoji i mogućnost da se dizajnira motor koji bi maksimalnu brzinu postizao pri nominalnom naponu. Kod ove mašine se rad u području konstantne snage postiže tako što se intenzitet struje smanjuje sa povećanjem brzine, a fluks u mašini ostaje konstantan /28/.

U svakom od pomenutih metoda se žrtvuje efikasnost i/ili specifična snaga i moment pogona. U prvom slučaju je jasno da se motor mora predimenzionisati da bi mogao bez oštećenja da podnese povećanje struje. Kod trećeg metoda motor ostaje uobičajenih dimenzija, ali se invertor mora predimenzionisati kako bi se obezbedio opisani režim rada u slabljenju polja. Poluprovodničke prekidačke komponente u invertoru moraju biti dimenzionisane tako da izdrže rad sa maksimalnim naponom i strujom, a u mašini se oni nikada istovremeno ne javljaju. Kada se uzme u obzir da je cena invertora još uvek dominantna u ceni pogona može se pretpostaviti da je primena ovog metoda veoma ograničena.

Motori sa PM očigledno imaju niz izrazitih prednosti u odnosu na druge tipove motora, ali i izrazit nedostatak u vezi sa radom u režimu konstantne snage. Da bi se prevazišli ovi problemi primenjuju se hibridni motori kojima je posvećen odeljak 4.4.

Nedostatak koji je vezan kako za PM tako i za hibridne motore je opasnost od demagnetizacije PM. Do demagnetizacije može doći zbog pojave kratkog spoja od kog se ova mašina teško štiti ili zbog pregrevanja mašine. Do delimičnog razmagnetisanja može da dođe i

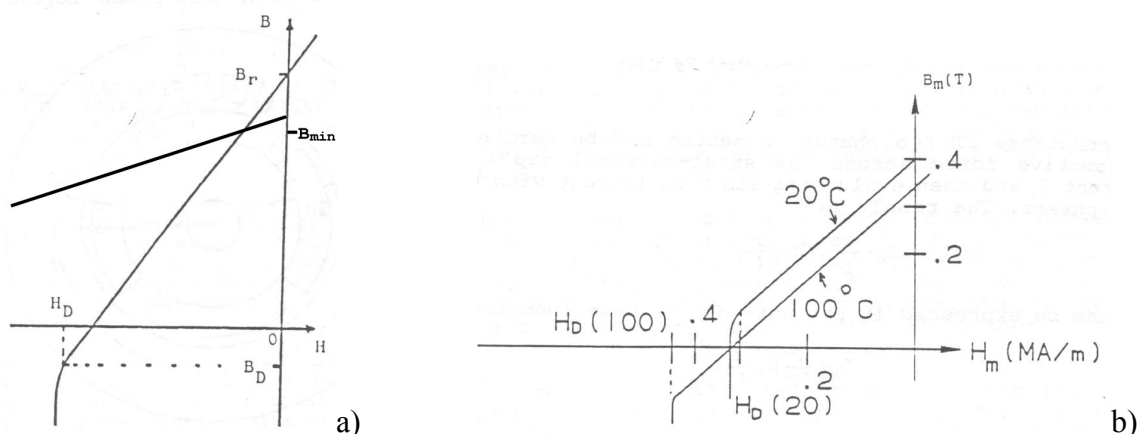
ako se ne premaši Kirijeva temperatura. Delimično razmagnetisanje utiče na performanse mašine /28/. Da bi se malo detaljnije razmotrio ovaj problem, prvo će biti opisan postupak dimenzionisanja PM.

Postupak dimenzionisanja PM opisan je u /24/ i /34/. Prvi korak u dimenzionisanju je da se na osnovu željenog momenta odabere vrednost magnetne indukcije u zazoru. Zapravo, na osnovu momenta se nalazi proizvod magnetne indukcije i linijske gustine struje. Vrednost indukcije u zazoru je ograničena magnetnim zasićenjem zubaca statora /34/. Za odabrani materijal poznata je vrednost remanentne indukcije, Sl. 26 a). Ova vrednost je povezana sa vrednošću indukcije u zazoru na osnovu jednačine magnetnih padova napona.

Drugi korak je određivanje odnosa debljine PM u odnosu na širinu zazora (l_m/δ), a u funkciji remanentne indukcije (B_r), indukcije u zazoru (B_0) i permeabilnosti PM (μ_r). Ovaj odnos je dat relacijom (4.15).

$$\frac{l_m}{\delta} = \frac{\mu_r}{\frac{B_r}{B_0} - 1} \quad (4.15)$$

Očigledno je da debljina PM ne zavisi od snage mašine. Zapremina PM povezana je sa dužinom mašine i njegovom širinom, tj. delom obima koji pokriva. Generalno, sa povećanjem snage i veličine mašine opada odnos zapremine PM prema zapremini mašine.



Sl. 26. Dimenzionisanje PM: a) radna tačka PM prema B_{min} ,
b) temperaturne promene karakteristika PM

Dodatni uslov koji se mora imati u vidu prilikom dimenzionisanja PM je njegova zaštita od demagnetizacije. U slučaju nastanka kratkog spoja mogu se uspostaviti izuzetno velike vrednosti struja u mašini. Ovo može da dovede do razmagnetisanja, ako je vrednost magnetnog polja statorske struje veća od vrednosti koercitivnog polja. Posebno treba obratiti pažnju na činjenicu da sa povećanjem temperature opada vrednost koercitivne sile. Da bi se PM zaštitio od razmagnetisanja neophodno je povećati njegovu debljinu kako bi se dodatno smanjila induktivnost magnećenja i uticaj statorskog polja na PM /34/.

Primeri motora sa PM su vučni motori sledećih modela EV i HEV: *BMW E1/E2* i *U2001* - BLDC motori, odnosno *Ford GE-ETXII* i *GM Precept* sa sinhronom PM mašinom. Na Sl. 27. je *GM Precept HEV* i njegov sinhroni PM starter generator.



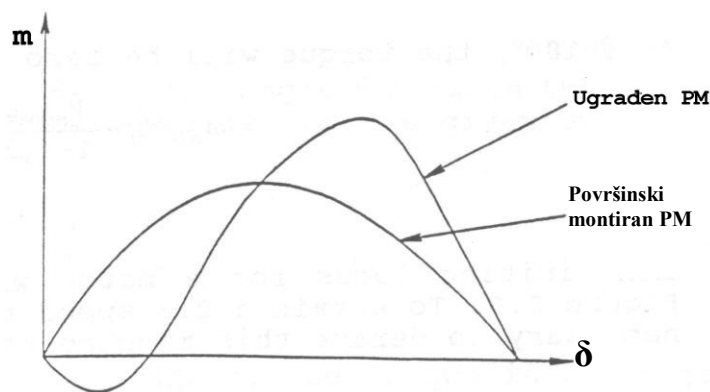
Sl. 27. GM Precept i njegov sinhroni PM motor/generator proizvođača *Unique Mobility Inc.*

4.2.1 Sinhroni PM motor

Sinhroni PM motor je prikazan na Sl. 23. a). On se odlikuje raspodeljenim namotajem statora kao kod asinhronog motora. Posledica ovakve raspodele je mogućnost napajanja motora iz sinusoidalnog izvora napajanja (mreže) /3/. Međutim, najčešće je ovaj motor napajan iz invertora da bi mu se obezbedila primena u pogonima promenljive brzine. Da bi se obezbedila harmonijska raspodela fluksa po obimu motora, mogu se primeniti PM promenljive debljine. Međutim, ovo je retko slučaj pa se magnetno polje ovih motora u suštini ne razlikuje od polja motora sa pravougaonom pobudom (BLDC). Jedan primer motora sa PM promenljive debljine prikazan je u 4.5.1, odnosno /69/.

Sinhroni PM motor se po principu svog rada ne razlikuje od klasičnog sinhronog motora. Za sinhroni PM motor čiji su magneti montirani na površini rotora važi relacija (4.16) i grafik sa Sl. 28. /32/. Očigledno je da intenzitet momenta zavisi od ugla opterećenja δ , magnetnog fluksa u zazoru Φ_{pob} i magnetopobudne sile obrtnog polja f_{st} , koja je srazmerna struji statora.

$$m = const \cdot \Phi_{pob} \cdot f_{st} \cdot \sin \delta \quad (4.16)$$



Sl. 28. Momentna karakteristika sinhronog motora sa površinski montiranim i ugrađenim PM

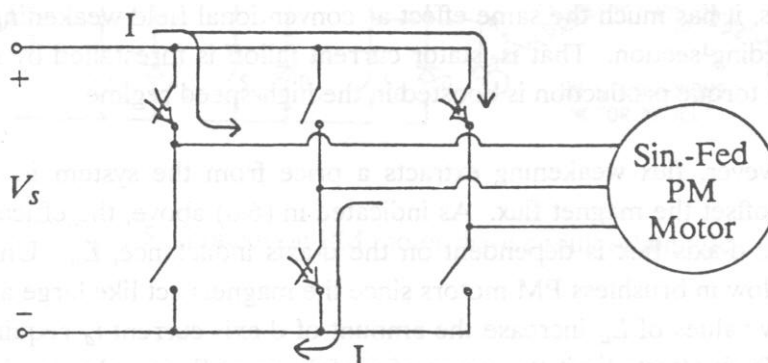
Na istom grafiku je prikazana i momentna karakteristika sinhronog PM motora sa ugrađenim magnetom. Ovaj momenat je izražen relacijom (4.17) /33/. Razlika je posledica reluktantne komponente momenta kod motora sa ugrađenim magnetima. Ova razlika je naročito značajna pri malim uglovima opterećenja, gde moment motora sa ugrađenim PM može da ima i negativnu vrednost.

$$m = const \cdot |f_{st}| \cdot [2 \cdot \Phi_{pob} \cdot L_q \cdot \sin \delta - |f_{st}| \cdot (L_q - L_d) \cdot \sin 2\delta] \quad (4.17)$$

PMSM se najčešće izrađuje sa trofaznim namotajem na statoru, mada postoje primeri motora sa više faza /29/. Prednosti višefaznih izvedbi nad uobičajenom trofaznom su iste kao kod asinhronih motora (odjeljak 4.1.1).

Napajanje trofaznog PMSM se ne razlikuje od ekvivalentnog asinhronog motora. Potrebno je koristiti trofazni invertor koji se upravlja po nekom od poznatih algoritama, na

primer PWM. Ovo predstavlja osnovnu razliku između ovih mašina i BLDC. Stoga je neophodno napomenuti da se u svakom trenutku u invertoru nalazi uključeno tačno tri prekidačka elementa, u svakoj grani po jedan. Ovakva situacija je prikazana na Sl. 29. Kada se PMSM optereti maksimalnim momentom pri nazivnoj brzini, kroz motor protiče maksimalna struja, a strujni regulatori u upravljačkom kolu su u zasićenju /34/. U toj situaciji svaki od prekidača vodi tačno 180° . Ova činjenica je veoma bitna da bi se razumelo poređenje BLDC i PMSM motora koje će biti prikazano u narednom odeljku.



Sl. 29. Napajanje PMSM iz invertora - uključenost prekidača u invertoru

Upravljački algoritam koji se primenjuje u pogonima EV sa PMSM, treba da obezbedi brzo i precizno upravljanje momentom motora. Da bi se upravljalo momentom sinhronog motora neophodno je menjati ugao opterećenja koji u stvari predstavlja ugao između indukovane kontra ems i napona napajanja. To je, zapravo, prirodan način rada neregulisane mašine. Promena ovog ugla uslovljava promenu intenziteta struje, ali i faznog stava. Nekomolirana promena ovih parametara nije poželjna u pogonu.

Zbog navedenih razloga se i kod PMSM koristi vektorsko upravljanje. Ono omogućava da se mašina eksploatiše sa jediničnim faktorom snage u opsegu brzina od mirovanja do nominalne vrednosti brzine. Promena momenta se ostvaruje promenom vrednosti statorske struje, odnosno napona. Upravljačko kolo se realizuje pomoću digitalnih mikroprocesora i to primenom modela mašine u prostoru stanja. Slično kao kod asinhronog motora i u ovom slučaju d komponenta struje mora da bude konstantna da bi se u mašini održavalo konstantno polje. Razlika je u tome što se kod PMSM ta komponenta struje održava na nultoj vrednosti, a pobudu u potpunosti obezbeđuje PM /34/.

Da bi se obezbedilo raspredanje poprečne i podužne komponente struje, kao i kod asinhronog motora, neophodno je obezbediti informaciju o položaju rotorske komponente fluksa. Standardna izvedba vektorskog upravljanja podrazumeva da je ugrađen davač položaja rotora na vratilo motora. Da bi se izbegla upotreba senzora razvijen je niz alternativnih metoda. Jedan takav metod je opisan i u /41/. Metod se oslanja na prostorne harmonike magnetnog polja koji se superponiraju na injektovani visokofrekventni signal. Zbog toga je on prvenstveno primenljiv kod motora sa ugrađenim PM i po autorima takav motor opremljen odgovarajućim upravljačkim algoritmom predstavlja pogon sa najviše izgleda za masovnu primenu u EV.

Alternativa vektorskom upravljanju je DTC³ algoritam upravljanja. Kod ovog algoritma se direktno, na osnovu informacija o vrednostima momenta na vratilu motora i fluksa u motoru bira signal za upravljanje PWM invertorom /33/. Ovde se upravlja mašinom na prirodan način opisan u jednom od prethodnih paragrafa. Naime, ukoliko je vrednost momenta manja od referentne, bira se takav vektor napona (signal za PWM invertor) koji će obezbediti brzo

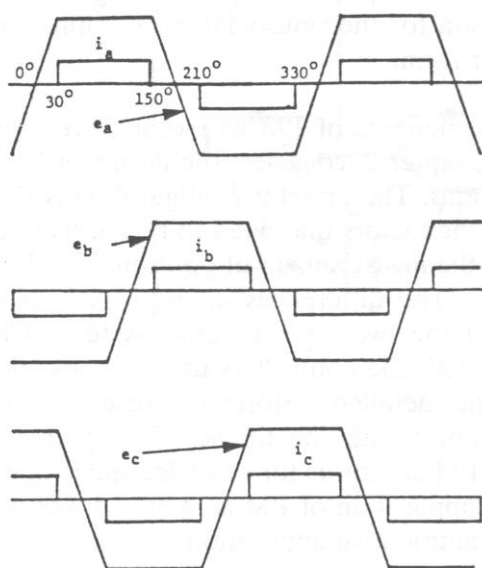
³ DTC je engleski akronim od Direct Torque Control - direktno upravljanje momentom.

povećanje ugla opterećenja δ . Ovo odgovara nagloj promeni faznog stava. Upravljački signali se biraju na osnovu odgovarajućih LOOK UP tabela.

Prednosti PMSM u odnosu na asinhroni motor su veća gustina snage, veći odnos momenta prema inerciji i nešto veći stepen korisnog dejstva u osnovnom području rada. Pored toga moguća je efikasnija regulacija bryine u otvorenoj petlji kao i lakša realizacija vektorskog upravljanja uz upotrebu ovog motora pošto je osetljivost na promenu parametara znatno manja nego kod asinhronog motora /42/. Nedostaci takvog pogona su: relativno niska brzina rada za površinski montirane PM zbog problema sa učvršćivanjem magneta, mali opseg brzina u režimu konstantne snage zbog postojanja konstantnog polja u mašini, smanjenje efikasnosti mašine za rad sa oslabljenim poljem, opasnost od demagnetizacije usled povećanja temperature, mehaničkih udara, struja kratkog spoja kao i mogućnost pojave privremene demagnetizacije usled izuzetno niskih temperatura. Svakako među nedostatke treba pomenuti i veću cenu u odnosu na asinhroni motor. I pored niza nedostataka mnogi autori smatraju da je upravo PMSM motor koji može da istisne asinhroni. Da bi se to dogodilo prvo mora doći do dodatnog pojeftinjenja PM na bazi retkih zemalja.

4.2.2 Brushless DC motor

Jedina konstruktivna razlika između BLDC motora i PMSM sa površinski postavljenim magnetima je to što kod ovog motora postoji manji broj žlebova na statoru. BLDC motori sa ugrađenim magnetima se ne izrađuju /34/. Broj žlebova statora je jednak broju polova motora. Ovakva konstrukcija je uslovljena funkcionalnom razlikom između ove dve vrste mašine. Naime, u ovom slučaju ni pobudni fluks ni napon statora nisu harmonijske funkcije. Na Sl. 30. su prikazani talasni oblici napona napajanja motora i kontra ems.

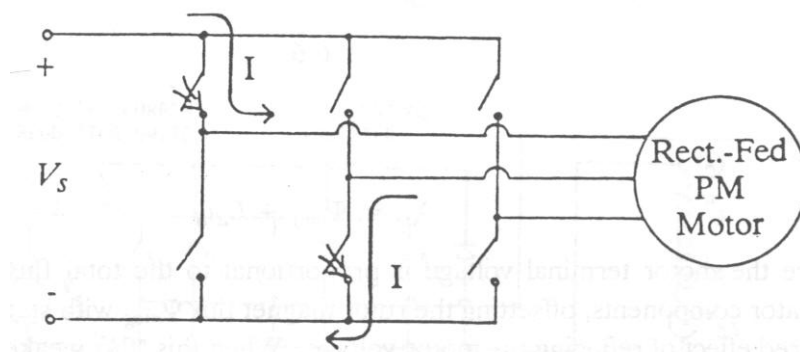


Sl. 30. Kontra ems i struje u BLDC motoru

Rad BLDC motora sa strujom u obliku povorke pravougaonih impulsa je posledica algoritma za upravljanje inverterom koji u suštini oponaša kolektor mašina za jednosmernu struju. Za trofazni BLDC motor u svakom trenutku vode samo 2 prekidača u inverteru /34/. Ovo je prikazano na Sl. 31. Za petofazni motor u jednom trenutku vode 4 prekidača (grane) invertora kao što je pokazano u /43/.

Stanje invertora menja se sinhrono sa promenom položaja rotora kao što se može videti sa Sl. 30. Kroz ovu sinhronizaciju praktično je sprovedeno vektorsko upravljanje BLDC

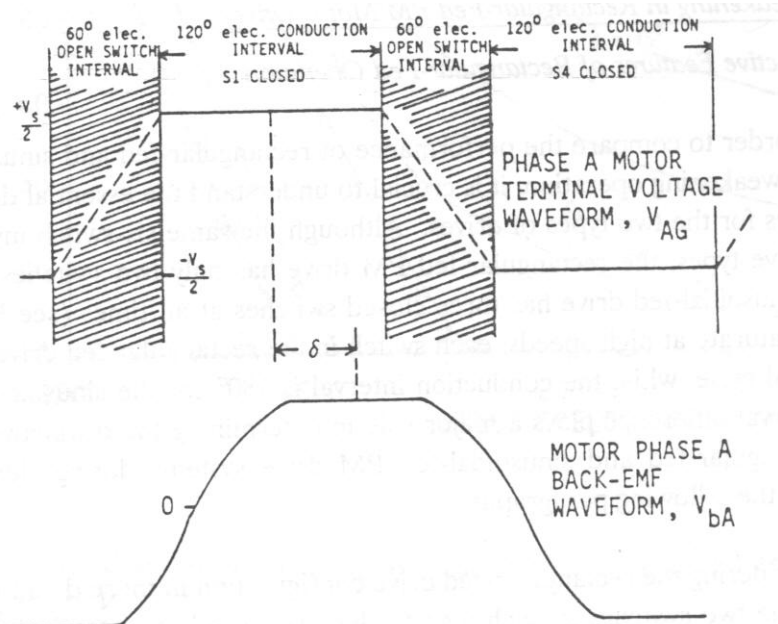
motorom jer su struje i kontra ems u fazi $/34/$ ⁴. Pri ovome se razvija maksimalan moment mašine dat relacijom (4.18). Ova relacija odslikava istu prirodu procesa kao i relacija (4.16). Naime, moment motora nastaje interakcijom polja statora i polja rotora. Polje statora je obrtno polje (kod PMSM Teslino obrtno polje) koje nastaje bez obrtnih delova, a polje rotora se obrće mehaničkim obrtanjem rotora.



Sl. 31. Stanje prekidača u invertoru za napajanje BLDC

$$m = 2 \cdot \Phi_{pob} \cdot I_{st} \quad (4.18)$$

Sl. 30. i relacija (4.18) odgovaraju radu mašine sa maksimalnim momentom gde je I_{st} efektivna vrednost struje statora. Da bi BLDC motor radio sa oslabljenim poljem neophodno je razdesiti fazni stav struja i napona. Ovo je prikazano na Sl. 32.



Sl. 32. Kontra ems i napon napajanja u režimu slabljenja polja

Poređenje performansi BLDC i PMSM motora moguće je izvršiti na način koji je opisan u $/34/$. Pošto je osnovna razlika između ove dve konstrukcije u načinu na koji se napajaju, tj. u tome što je pri punom opterećenju svaki prekidač u invertoru otvoren 180° kod PMSM, a 120° kod BLDC ($2/3$ perioda), poređenje je izvršeno tako što je isti motor napajan sa uglovima otvorenosti prekidača od 120° i 180° .

⁴ Kada bi se sprovedla Furijeova analiza signala u mašini i kada bi se na osnovne komponente struja primenile transformacije u dq područje, pokazalo bi se da je $I_d=0$.

U osnovnom režimu rada performanse su vrlo slične osim što je odnos proizvedenog momenta i efektivne vrednosti struje nešto povoljniji za BLDC, što znači da je prividna snaga invertora niža u tom slučaju. Razlike nastaju u oblasti slabljenja polja. U neposrednoj blizini nazivne brzine povoljnija je situacija sa uglom vođenja od 120° , ali je oblast slabljenja polja vrlo uska. Za ugao vođenja od 180° oblast konstantne snage je znatno šira. Naravno, da bi se ostvarilo slabljenje polja pomećen je ugao paljenja tranzistora u invertoru tako da prednjači za odgovarajući ugao δ prema Sl. 32.

Na osnovu ovoga se može zaključiti da je primena PMSM u EV daleko povoljnija nego što je slučaj sa BLDC. Pa ipak, češća je primena BLDC motora u EV. U nekim slučajevima se uz te motore koriste i mehanički menjači stepena prenosa, a u drugim slučajevima je nominalna brzina izabrana dovoljno visoko da se realizuje pogon bez mehaničkog prenosa.

Mada nema naročitih prednosti u odnosu na PMSM i asinhroni motor BLDC je značajno povoljniji od klasičnog motora jednosmerne struje za ovu primenu. Osnovna prednost je to što ne postoji mehanički kolektor pa ni varničenje na njemu. Sa ovim je povezana i mogućnost primene BLDC motora na znatno višim brzinama od brzina koje su svojstvene kolektorskim motorima. U pogledu nazivne brzine jedino ograničenje je mehanička čvrstoća rotora sa stalnim magnetima. Za rad sa konstantnom snagom neophodno je primeniti neko od pomenutih rešenja, što znači da neka od komponenti pogona mora da bude predimenzionisana.

U odnosu na PMSM i asinhroni motor, algoritmi upravljanja BLDC motora su robusniji samim tim što su jednostavniji. Ovo omogućava laku implementaciju pogona bez davanja brzine i sa minimalnim brojem senzora za struju, kao i sa mikrokontrolerom umerenih performansi i cene. Ne treba zanemariti ni činjenicu da je za napajanje ovog motora potreban inverter manje snage nego za druge motore, mada je ova prednost često umanjena potrebom za predimenzionisanjem motora ili invertora kako bi se omogućio rad sa oslabljenim poljem.

4.3 Reluktantni motori

Reluktantne električne mašine su odavno poznate. U svom prvom patentu koji se odnosi na mašine za naizmeničnu struju, sinhronu reluktantnu mašinu je opisao Nikola Tesla /22/. Međutim, ove mašine se nisu našle u masovnoj primeni do sadašnjeg vremena. Nešto masovnija primena sinhronih reluktantnih motora je zabeležena šezdesetih godina kada su masovno građene fabrike sintetičkih vlakana gde se ovaj motor koristio za njihovo upredanje /45/. U to vreme efikasnost i faktor snage ovih mašina nisu dostigli nivo asinhronog motora, a upravljanje praktično nije primenjivano već su oni radili u otvorenoj petlji. Ovi nedostaci su doprineli njihovom zanemarenju sa pojavom servo pogona sa asinhronim motorom. U poslednjim godinama reluktantne mašine ponovo dobijaju na popularnosti o čemu govori i broj članaka koji se objavljuju u vezi sa njihovim upravljanjem i konstrukcijom /45-64/. Razloge treba tražiti u unapređenju konstrukcije i performansi mašina kao i u primeni savremenih upravljačkih algoritama.

Budući da su reluktantne mašine u osnovi sinhronne, one su, slično PM mašinama, podesnije za upravljanje od asinhronog motora zbog manje osetljivosti na varijaciju parametara motora. Njihova prednost u odnosu na motore sa PM je to što se pri izradi ovih motora ne koriste skupi materijali i što je konstrukcija rotora čvršća nego kod PM motora. Može se očekivati da će se cena izrade reluktantnih motora izjednačiti sa cenom izrade asinhronog motora kada se ti motori budu izrađivali u velikim serijama. Detalji u vezi sa konstrukcijom reluktantnih motora biće izneti nešto kasnije u tekstu. Na Sl. 33. su prikazani poprečni preseki sinhronog reluktantnog motora (SyRM - Synchronous Reluctance Motor) i impulsnog reluktantnog motora (SRM - Switched Reluctance Motor).

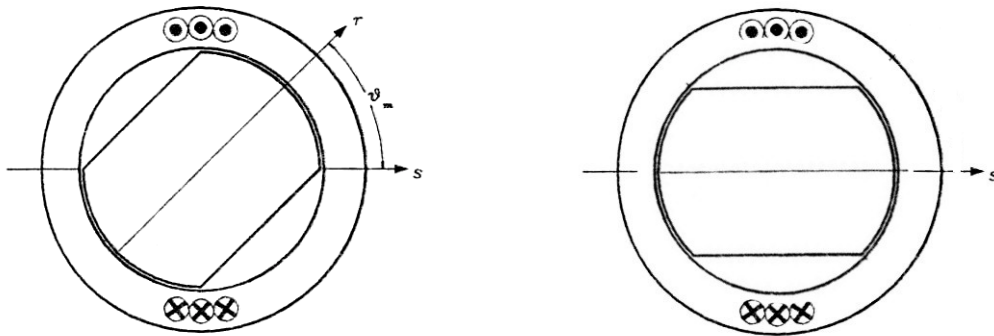
Odlika konstrukcije ovih mašina je istaknutost polova rotora kod SyRM, odnosno rotora i statora kod SRM. Posledica ovako napravljene neravnomernosti zazora je razlika otpora

magnetnog kola po podužnoj i poprečnoj osi. U ovakvoj strukturi se javlja moment koji teži da postavi rotor u položaj sa najmanjim otporom magnetnom fluksu mašine.



Sl. 33. Poprečni presek sinhronog reluktantnog motora (SyRM) i impulsnog reluktantnog motora (SRM)

Da bi se objasnio princip rada na Sl. 34. su prikazana dva položaja rotora u mašini sa samo jednim namotajem. Prvi položaj je neravnotežan i u tom slučaju postoji moment koji teži da zakrene rotor. Drugi položaj je ravnotežan i moment ne postoji bez obzira na struju koja protiče kroz statorski namotaj.



Sl. 34. Reluktantna mašina sa jednim namotajem - nastanak reluktantnog momenta

Ako se poznata relacija za moment konverzije električnih mašina, (4.19), primeni na mašinu sa Sl. 34., dobija se izraz za reluktantni momenat, (4.20). Pri ovome je pretpostavljena linearnost magnetnog kola mašine. Detalji izvođenja ovih izraza i dodatna objašnjenja mogu se pronaći u /65/. Princip rada SRM praktično je iskazan u relaciji (4.20). U izrazima su korišćene sledeće oznake: m predstavlja moment konverzije mašine, Ψ je fluksni obuhvat, θ_m je ugao koji zaklapaju osa rotora (mehanički položaj rotora) i magnetna osa statorskog namotaja, $\Delta L = L_d - L_q$ je razlika maksimalne i minimalne induktivnosti, i je trenutna vrednost struje namotaja statora.

$$m = \frac{1}{2} \cdot \left(i \cdot \frac{d\Psi}{d\theta_m} - \frac{di}{d\theta_m} \cdot \Psi \right) \quad (4.19)$$

$$m = -\frac{1}{2} \cdot \Delta L \cdot i^2 \cdot \sin 2\theta_m \quad (4.20)$$

Kako je istaknuto u /65/, moment konverzije postoji samo ako se ugao rotora razlikuje od 0° ili 90° . Ako se rotor izvede iz ravnotežnog položaja pod dejstvom reluktantne sile će se vratiti u taj položaj (uz prigušeno oscilovanje) i u njemu će ostati. Da bi se ostvarila konverzija energije neophodno je napajati namotaj statora sinhrono sa promenom položaja rotora. Upravo se to i čini kod SRM samo što u tom motoru postoji više namotaja na statoru koji se naizmenično uključuju da bi se obezbedilo kontinualno kretanje rotora. Očigledno je da će moment zavisiti od ugla između ose rotora i odgovarajućeg namotaja.

U /65/ je naveden i izraz (4.21) za moment konverzije SyRM, koji je tamo nazvan mašinom sa dva namotaja. Jedina razlika u odnosu na izraz (4.20) je upotreba ugla opterećenja

δ , koji predstavlja ugao između ose rotora i ose obrtnog magnetnog polja koje nastaje kada se kroz statorske namotaje propusti višefazna naizmenična struja. Sa I_s je obeležena efektivna vrednost statorske struje. Konstrukcija statora i princip nastanka obrtnog magnetnog polja su isti kao kod asinhronog motora pa nema potrebe da se ovde obrađuju.

$$m = \frac{1}{2} \cdot \Delta L \cdot I_s^2 \cdot \sin 2\delta \quad (4.21)$$

Na osnovu relacija (4.20) i (4.21) jasno je da se momentom reluktantnih motora upravlja kao momentom mašina sa PM - promenom ugla opterećenja i jačine struje. Pošto su i princip vektorskog i princip DTC upravljanja objašnjeni u prethodnom odeljku u nastavku teksta, paragrafima 4.3.1 i 4.3.2, će biti obrađene samo specifičnosti koje se javljaju kod reluktantnih mašina.

Zajednička svojstva reluktantnih motora su malobrojna. Ona se uglavnom odnose na činjenicu da ne postoji namotaj na rotoru tako da se ovi motori odlikuju visokom efikasnošću, mada manjom od efikasnosti motora sa PM. Povoljna činjenica za primenu u EV je bezbednost u radu ovih motora s obzirom na niske napone praznog hoda i male struje kratkog spoja.

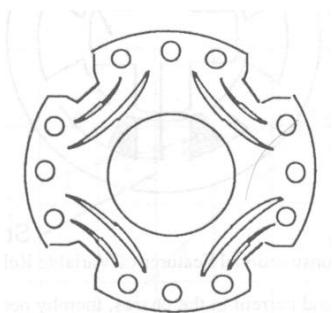
Problemi u primeni reluktantnih motora uglavnom su povezani sa valovitošću momenta kao i sa bukom i vibracijama koji su povezani sa tim. Drugi problem je upravljanje bez davača položaja. Kao i kod ostalih sinhronih mašina i ovde je potrebno poznavati apsolutan položaj rotora motora da bi upravljanje bilo efikasno. Zbog poznatih problema sa primenom davača položaja u EV, razvijaju se algoritmi za estimaciju ugla zakrenutosti rotora.

Na osnovu izraza (4.20) i (4.21) se vidi da je za ostvarenje što većeg momenta konverzije potrebno da razlika maksimalne i minimalne induktivnosti u mašini bude što veća. Da bi se to postiglo neophodno je praviti mašine sa malim zazorom /28/. Mali zazor neophodan je i da bi se obezbedili dobra efikasnost i faktor snage reluktantnih motora /45/ što poskupljuje izradu ovih, inače jeftinih, mašina.

Zahvaljujući svojoj robusnosti, efikasnosti i mogućnosti da rade na izuzetno velikim brzinama reluktantni motori su zaslužili svoju popularnost. U /49/ je baš zbog ovih odlika predložena upotreba SyRM motor/generatora za sistem rezervnog napajanja sa zamajcem. Slična svojstva treba da zadovoljava i motor primenjen u EV/HEV. Zbog toga autori reference /59/ konstruišu SRM za primenu u EV, a u /52/ se sensorless pogon sa SyRM pominje kao posebno pogodan pogon za primenu u laganim drumskim vozilima na električni pogon. Izveštaji o praktično izvedenim pogonima sa reluktanim mašinama koji bi se koristili u EV/HEV, na žalost nisu pronađeni u dostupnoj literaturi. Izuzetak čini navod iz /2/ da je kompanija *EMB Inc.* započela sa proizvodnjom električnih motocikala koji za pogon koriste SRM.

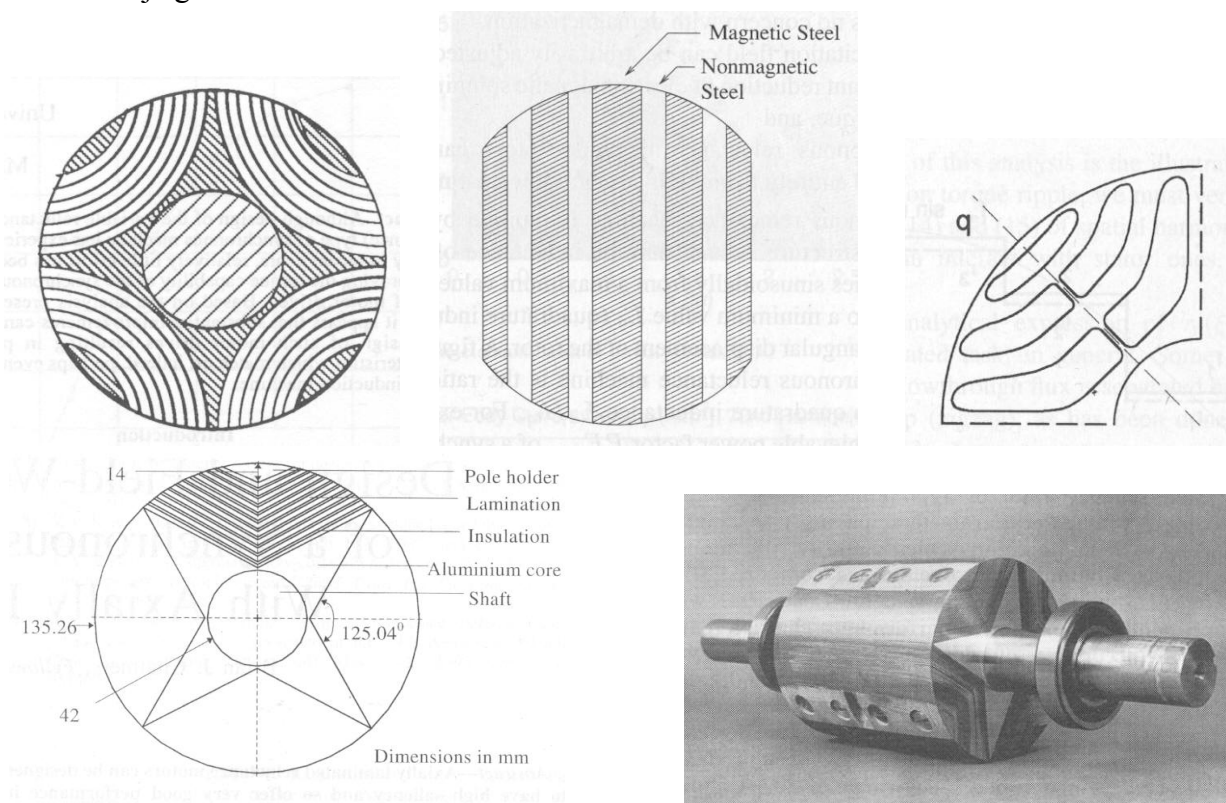
4.3.1 Sinhroni reluktantni motor (SyRM)

SyRM se odlikuje isturenošću rotora pri čemu je stator cilindričan kao kod asinhronih mašina. Ovo je značajno jer utiče na smanjenje proizvodne cene. Specifičnosti konstrukcije i istraživanja su, sasvim razumljivo, usmereni ka obliku rotora /46-50/ i /67/. U osnovnoj izvedbi rotor je imao oblik sličan onima na Sl. 33. i 34. Izrada takvog rotora je izuzetno jednostavna pa je u /46/ pokazano kako se može izvršiti njegova optimizacija. Međutim, takvi rotori se više ne koriste kao ni rotori sa aksijalnom laminacijom, prikazanom na Sl. 35. /45/. U retko korišćene rotore se danas ubrajaju i rotori sa kavezom prikazani u /47/ i /54/. Takvi rotori su korišćeni za SyRM koji su se priključivali direktno na mrežu. Kako se danas praktično svi reluktantni motori napajaju iz invertora, izgubila se potreba za kavezom za startovanje. To je istovremeno otvorilo mogućnosti za izradu drugačijih tipova rotora.



Sl. 35. Poprečni presek rotora za SyRM sa aksijalnom laminacijom i kavezom za startovanje

Danas se uglavnom projektuju SyRM sa tranverzalom laminacijom, koji se sastoje iz slojeva feromagnetnog materijala i pregrada od nemagnetnog materijala. Nekoliko poprečnih preseka takvih rotora prikazano je na Sl. 36. /45/, /49/ i /50/. Pored poprečnih preseka na Sl. 36. je prikazana i fotografija rotora opisanog u /67/. Projektanti SyRM uglavnom optimizuju konstrukciju rotora tako da obezbede maksimalan odnos podužne i poprečne induktivnosti čime je obezbeđena velika vrednost momenta, visoka efikasnost i faktor snage. U /50/ je, međutim, osnovni kriterijum optimizacije smanjenje valovitosti momenta, a u /49/ je osnovni cilj minimizacija gubitaka u rotoru.



Sl. 36. Poprečni preseki nekoliko savremenih rotora i fotografija rotora SyRM sa tranferzalnom laminacijom

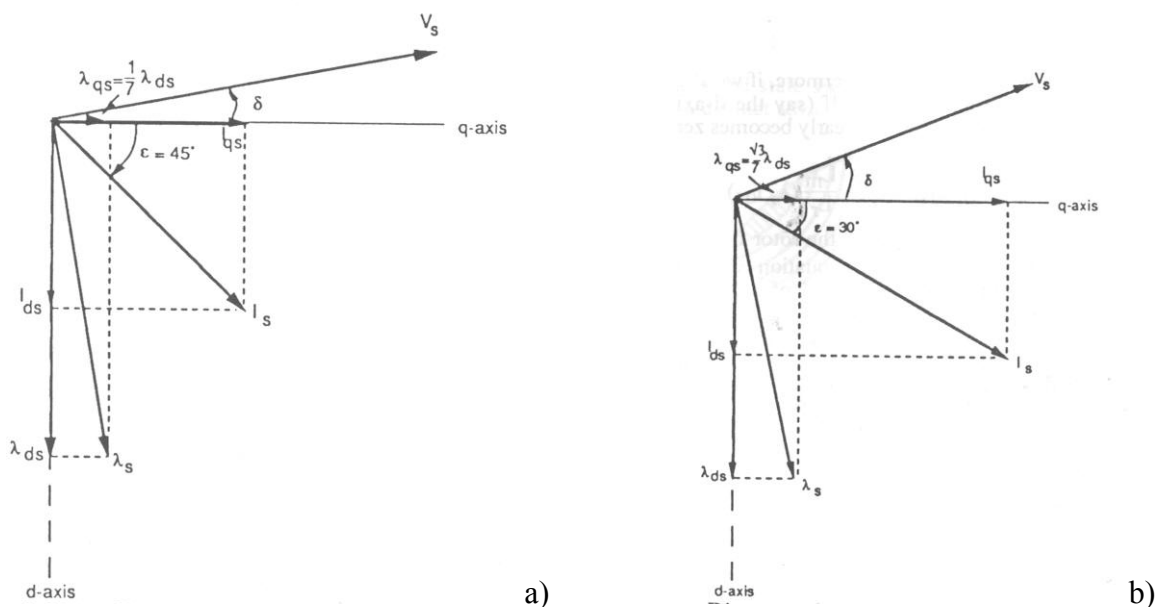
Da bi SyRM radio sa dobrom efikasnošću i faktorom snage neophodno je obezbediti odnos L_d/L_q veći od 7 /28/. Nekada je to bilo teško ostvarivo pa je efikasnost ovih motora bila slabija nego kod asinhronih i imali su manji specifičan moment. Sa sadašnjom tehnologijom se relativno lako ostvaruju potrebni odnosi induktivnosti tako da SyRM postaje konkurentan asinhronom motoru. Odnos momenta SyRM i asinhronog motora istih dimenzija izračunat je u /45/ i iznosi 0.82. Međutim, odnos gubitaka za isto strujno opterećenje je 0.5 tako da se SyRM može dodatno opteretiti. Kada se struja reluktantnog motora izabere tako da su gubici u njemu jednaki gubicima u ekvivalentnom asinhronom motoru odnos momenata se penje na 1.42.

Prednost ovog motora u odnosu na asinhroni koja se ogleda u većem specifičnom momentu, donekle je zasenjena nešto slabijim faktorom snage, tako da se za njegovo napajanje mora upotrebiti inverter veće snage i cene.

Iako je stator cilindrične konstrukcije kao kod asinhronog motora, za izradu motora vrhunskih performansi nije moguće zanemariti ni njegov uticaj. U /49/ je korišćen stator sa zatvorenim žlebovima, a statorski namotaj je izrađen od bakarnih profilisanih šipki jer se u zatvorene žlebove ne mogu ulagati klasični namotaji. Upotreba šipki je moguća zahvaljujući ekstremno visokoj nazivnoj brzini mašine (preko 10000 o/min) tako da je potreban mali broj navojaka u statoru. Na ovaj način su minimizovani gubici u rotoru mašine. U /50/ je za potrebe smanjenja valovitosti momenta bilo neophodno na odgovarajući način uskladiti broj žlebova u statoru sa brojem graničnih površina između magnetnog i nemagnetnog materijala na rotoru.

Najznačajniji nedostatak SyRM koji je naročito bitan sa aspekta primene u EV je mali opseg brzina za rad u režimu konstantne snage. U /28/ se navodi da je teško postići odnos maksimalne i nominalne brzine od 2:1 sa ovim motorom. Zbog čega je to tako ovde će biti objašnjeno na osnovu analogije sa preopterećenjem mašine. Zapravo su režim rada u oblasti konstantne snage i rad preopterećene mašine analogni procesi (pokazano i u odeljku 4.1). Drugim rečima širina oblasti konstantne snage srazmerna je preopteretljivosti motora /4/.

Na Sl. 37 su prikazani vektorski dijagrami SyRM koji radi u nominalnom režimu (pod a) i istog tog motora u režimu sa statorskom strujom koja je $\sqrt{2}$ puta veća od nominalne (pod b). Pošto je u nominalnom režimu vrednost napona na priključcima mašine jednaka nominalnoj vrednosti onda je i fluks u mašini jednak nominalnom, odnosno maksimalnom fluksu. Zapravo, u svim režimima rada sa momentom manjim ili jednakim nominalnom, fluks u SyRM se održava na konstantnoj vrednosti koja je jednaka nominalnoj (srazmerno sa I_{ds}), a vrednost momenta se podešava promenom intenziteta statorske struje (komponente I_{qs}) /45/, prema relaciji (4.21). Na ovaj način se proizvodi maksimalan momenat sa minimalnom vrednošću gubitaka u mašini i sa maksimalnom efikasnošću.



Sl. 37. Vektorski dijagrami SyRM u: a) nominalnom i b) režimu preopterećenja

Pošto je nemoguće dalje povećavati fluks u mašini, preopterećenje mašine se mora postići povećanjem intenziteta statorske struje. Povećanje intenziteta statorske struje obavlja se na račun promene faznog stava struje, pošto je magnetizacionu komponentu struje I_{ds} nemoguće povećavati s obzirom da se mašina nalazi u zasićenju. Da bi se kvantitativno pokazalo šta se

dešava u mašini neophodno je koristiti relaciju za izračunavanje momenta preko komponenti statorske struje, (4.22) /45/.

$$m = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot (L_{ds} - L_{qs}) \cdot i_{ds} \cdot i_{qs} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot (L_{ds} - L_{qs}) \cdot I_s \cdot \sin \delta \cdot I_s \cdot \cos \delta \quad (4.22)$$

Pošto je u ovom režimu konstantan fluks, konstantan je i proizvod:

$$\Psi_{ds} = i_{ds} \cdot L_{ds} = \text{const.} \quad (4.23)$$

Očigledno je da se u tim uslovima relacija (4.22) svodi na (4.24):

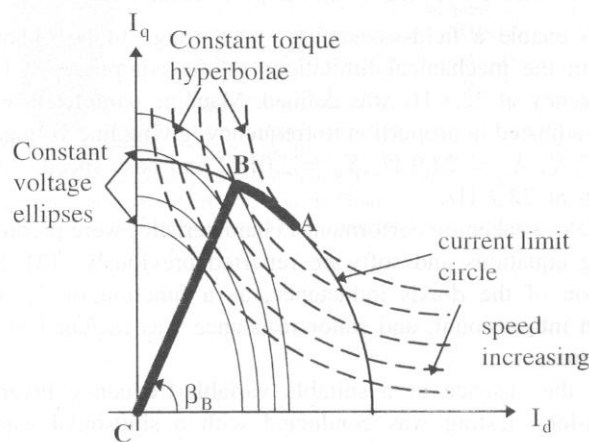
$$m \sim I_s \cdot \cos \delta \quad (4.24)$$

Kada se moment menja od nominalne do maksimalne vrednosti, ugao opterećenja δ se menja od 45° do 0° . Odnos maksimalnog i nominalnog momenta iznosi:

$$\frac{m_{\max}}{m_n} = \frac{\cos 0^\circ}{\cos 45^\circ} = 1.41 \quad (4.25)$$

Sada je lako pokazati da, ukoliko se motor pogoni u režimu konstantne snage, ugao opterećenja dostiže vrednost 0° za brzinu koja je za svega 41% veća od nominalne vrednosti. Naravno, ovaj režim rada je povezan sa smanjenjem efikasnosti motora na račun povećanih gubitaka u bakru i smanjenog faktora snage. Sve ovo znači da je nužno predimenzionisati inverter kojim se napaja motor. Ako se uzme u obzir da se SyRM svakako preopterećuje kako bi se postigla veća vrednost specifičnog momenta i snage nego kod asinhronog motora, onda je sasvim jasno da je opseg brzina u režimu konstantne snage limitiran na vrlo malu vrednost.

Prethodna analiza opsega brzina u režimu oslabljenog polja odnosi se samo na deo karakteristike sa konstantnom snagom. Maksimalna brzina se ostvaruje pri smanjenoj snazi. Na ovu brzinu utiče odnos podužne i poprečne induktivnosti. Ovo je pokazano u /67/ gde je proučavan SyRM sa odnosom L_d/L_q od 12.5:1. U tom slučaju je odnos maksimalne i nominalne brzine jednak 2.25:1. U /67/ nije prikazan matematički postupak kojim bi se procenila vrednost maksimalne brzine, ali je prikazan hodograf vektora struje u i_d - i_q ravni, za različite režime rada. Ovo je prikazano na Sl. 38. Tačka A odgovara nominalnom režimu rada. Svi režimi rada sa nižom brzinom i momentom (strujom) leže ispod kružnice maksimalne struje. Režim konstantne snage se nalazi između tačaka A i B pri čemu su i struja i napon maksimalni. Prirodan režim rada nastupa u tački B i traje do tačke C. U tom režimu je nužno smanjivati struju jer je napon nedovoljan da održi veću vrednost struje (slično kao kod PMSM).



Sl. 38. Struja SyRM u zavisnosti od režima rada

Osim prikazanih ograničenja rada u režimu slabljenja polja, ovaj režim rada je teško ostvariti i zbog problema sa dinamičkom stabilnošću koji su nagovešteni u /67/ i /28/.

Koliko je zaista kompaktniji i lakši vučni SyRM u odnosu na asinhroni motor koji obezbeđuje iste performanse vozila predmet je ozbiljne tehnoeekonomske analize. Početna prednost SyRM lako se može izgubiti kada se izabere asinhroni motor koji je konstruisan sa izuzetno širokim opsegom brzina u režimu konstantne snage. Naravno, treba računati i sa odgovarajućim inverterima i treba uzeti u obzir specifičnosti upravljačkih algoritama. Poslednji, ali možda i najvažniji parametar analize je cena čitavog pogona. Ovakva tehnoeekonomska analiza nije tema ovog rada pa neće ni biti sprovedena.

Sensorless pogoni su tema mnogih naučnih radova /51-53/. Iako je moguće skalarno regulisati pogon sa SyRM, najbolji rezultati se postižu ako se primeni vektorsko ili DTC upravljanje. Ovi algoritmi su skupčani sa potrebom određivanja apsolutnog položaja rotora u svakom trenutku. Standardan pristup je upotreba davača apsolutnog položaja koji je skuplji i složeniji od inkrementalnog enkodera koji se koristi sa asinhronim motorom.

Do sada je razvijen niz opservera koji na osnovu merene struje i/ili napona napajanja motora određuju njegov položaj. Ni jedan od tih metoda nije bez ozbiljnih nedostataka. Uglavnom su svi ograničeni na primenu pri višim brzinama, a imaju i niz drugih nedostataka. Na primer, metod koji koristi informaciju o trenutku prolaska struje kroz nulu za određivanje položaja rotora ima malu rezoluciju jer struja u toku jedne periode svega 6 puta ima nultu vrednost /53/. Metode koje se oslanjaju na praćenje varijacije induktivnosti motora se mogu primeniti i pri mirovanju, ali se dobijaju signali sa jako velikim nivoom šuma pošto se u opserveru koristi diferencijacija /53/. U /51/ je pokazano kako se može ostvariti estimacija fluksa što je neophodno za primenu DTC algoritma upravljanja.

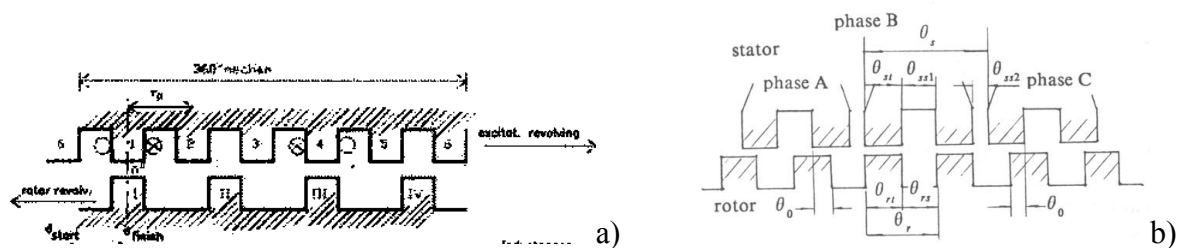
Metodi estimacije položaja na osnovu injektovanja visokofrekventnih signala opisani su u /20/, /52/ i /53/. Na osnovu ovih radova se stiče utisak da se radi o metodu koji najviše obećava. Prednosti su što se metod može primeniti pri svim brzinama, ne podrazumeva poznavanje parametara mašine pa nije ni osetljiv na njihovu varijaciju, a u slučaju reluktantnih mašina se lako primenjuje jer ove mašine imaju isturenu strukturu magnetnog kola. Detaljna objašnjenja ovih metoda izlaze iz okvira ovog rada.

4.3.2 Impulsni reluktantni motor (SRM)

SRM predstavlja osnovnog konkurenta asinhronom motoru za primenu u EV. Odlikuje se jednostavnom, robusnom i čvrstom konstrukcijom koja omogućava rad i pri ekstremno visokim brzinama. Za razliku od SyRM, ovaj motor se odlikuje i veoma širokom oblašću konstantne snage pa je i to razlog zašto ga mnogi autori preporučuju za ugradnju u EV /55/, /59/, /60/, /62/, /63/.

Konstrukcijska karakteristika je isturenost na rotoru i statoru koja uslovljava pojavu reluktantnog momenta izraženog pomoću (4.20). Princip rada je da se namotaji statora sekvencijalno, odnosno u krug, napajaju impulsima napona sinhrono sa promenom položaja rotora. Kada se na jedan od namotaja statora dovede napon javlja se reluktantni moment koji teži da postavi rotor u položaj sa minimalnim magnetnim otporom. Ako se u trenutku kada rotor zauzima taj položaj isključi posmatrani statorski namotaj i napon dovede na naredni namotaj, rotor se nalazi u nestabilnom položaju u odnosu na taj namotaj. Posledica toga je pojava reluktantnog momenta koji teži da postavi rotor u novi ravnotežan položaj.

Na osnovu samog opisa principa rada se može naslutiti da je moment koji se javlja u toku rada SRM izuzetno neravnomeran. Budući da se moment menja sa promenom položaja rotora nemoguće je potpuno eliminisati valovitost. Da bi se valovitost smanjila na razumnu meru primenjuju se specijalne konstrukcije rotora sa više zubaca po polu. Na Sl. 39. je prikazana razvijena skica vazdušnog zazora standardnog SRM i SRM sa više zubaca po polu.

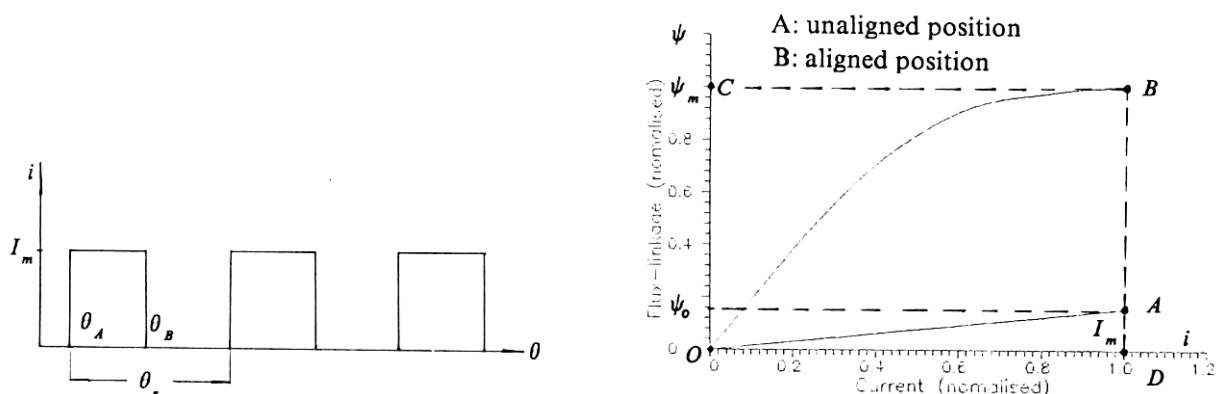


Sl. 39. Razvijene skice vazdušnog procepa SRM: a) sa glatkim polovima, b) sa nazubljenim polovima

Pri projektovanju SRM neophodno je obezbediti "razumnu" strukturu magnetnog kola i mogućnost samostalnog startovanja iz bilo kog položaja rotora /57/. Pod razumnom strukturom magnetnog kola se podrazumeva da broj faza i polova odgovara željenim performansama motora, da je međuinuktivnost statorskih namotaja što manja i da je razlika između maksimalne i minimalne magnetne permeabilnosti što veća. Zahtev za samostalnim startovanjem je zadovoljen ako broj zubaca na statoru i rotoru motora nije jednak. U toj varijanti ni jedan položaj rotora nije idealan, odnosno ni jedan položaj nije ravnotežan u odnosu na bilo koji od namotaja statora.

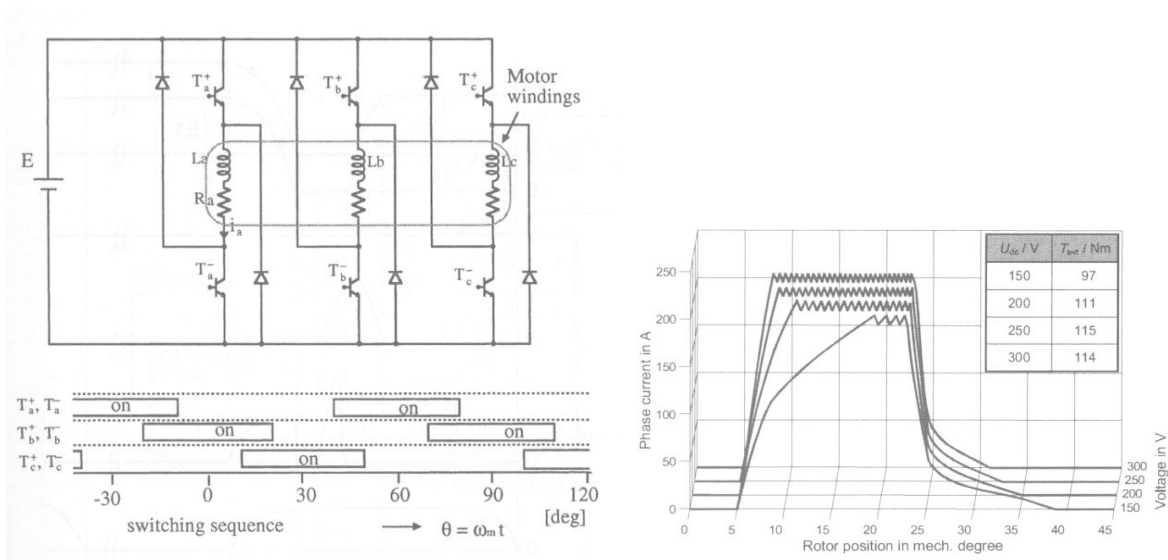
Optimizacija strukture sa glatkim polovima se svodi na određivanje optimalne širine polova rotora i statora i na izbor odgovarajućeg broja polova na njima /59/. Uobičajene strukture su 8-6, 6-4 i 12-6 /28, 59/, mada postoje i druge mogućnosti. U /57/ je prikazan princip projektovanja SRM sa nazubljenim polovima statora i rotora. Pokazano je da je za maksimalan odnos maksimalne i minimalne permeanse potrebno obezbediti apsolutno poklapanje zubaca jednog pola statora i rotora. Ovo se može videti na Sl. 39. Zahvaljujući ovom uslovu postoje određena ograničenja pri usvajanju broja zubaca rotora i statora. Niz mogućih rešenja se može pronaći u /57/.

Posupak projektovanja ovih motora se razlikuje od postupka projektovanja motora sa sinusoidalnom pobudom jer se kao parametar pri projektovanju ne koristi induktivnost, već karakteristike magnećenja za poravnat i neporavnat položaj /56, 57/. Idealan talasni oblik struje namotaja i karakteristika magnećenja su prikazane na Sl. 40.



Sl. 40. Idealan oblik struje kroz namotaj i karakteristika magnećenja za poravnat i neporavnat položaj

Stvaran oblik struje zavisi od strukture mašine, ali i od načina napajanja. Postoje dva načina napajanja SRM. Češći način je takozvano čopovano napajanje kod kog se vrednost struje kroz namotaj podešava uz pomoć DC/DC pretvarača - čopera. Pri tome se često inverter napaja iz čopera, a prekidačka sekvenca invertora je konstantna, mada se i u samom invertoru može izvršiti regulacija. Klasična šema napajanja sa regulacijom u samom invertoru i oblici struje u funkciji od napona prikazani su na Sl. 41.



Sl. 41. Kolo za napajanje SRM i oblici struja u funkciji napona na priključcima motora

Budući da se namotaji SRM odlikuju izuzetno velikom induktivnošću i da samim tim u toku vođenja akumuliraju veliku magnetnu energiju, veliki su i gubici usled komutacije u inverteru. Zbog toga je u /60/ predložena šema takozvanog *Soft-Switching* invertora. Pri tome je iskorišćena mogućnost da se kolo za napajanje SRM napravi kao unipolarno. BLDC motor ne može da se napaja unipolarno jer je polaritet PM definisan i kada se ne bi propustila struja odgovarajućeg smera rotor bi bio odbijen, umesto da bude privučen određenom polu statora. Kod SRM to nije slučaj jer se on postavlja u položaj sa najmanjom reluktansom, bez obzira na polaritet struje koja stvara magnetni fluks u mašini.

Mogućnost unipolarnog napajanja SRM praktično znači da u inverteru trofaznog SRM ima duplo manje prekidačkih elemenata nego u inverteru asinhronog motora. Ova činjenica govori i u prilog bezbednosti upotrebe SRM. Pored toga što su indukovani naponi u praznom hodu gotovo jednaki nuli i što su struje kratkog spoja u motoru izuzetno niskog intenziteta, kod SRM ne postoji mogućnost pojave čistog kratkog spoja ni u inverteru. Čak i ako je upotrebljena topologija sa 6 prekidača između njih se nalaze namotaji SRM koji onemogućavaju pojavu kratkog spoja u inverteru usled nepravilnog upravljanja prekidačima.

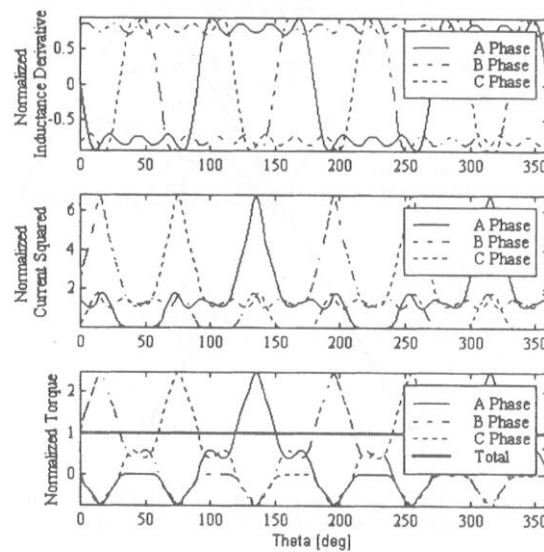
Drugi način napajanja predložen je u /55/. U tom radu je optimizovano prekidačko upravljanje SRM od 60 kW za pogon EV. Cilj je bio postići maksimalnu moguću efikasnost pogona. Zbog toga je izbegnuta upotreba čopera čiji su gubici usled komutacije značajni. Pošto je neophodno obezbediti promenljivi napon na ulazu u inverter, a linearni regulator napona takođe stvara velike gubitke, rešenje je nađeno u skokovitoj promeni vrednosti napona. Promenom napona u 10 koraka postiže se poboljšanje efikasnosti pošto to omogućuje da ugao vođenja prekidača u inverteru bude blizak optimalnoj vrednosti.

Posebnu zanimljivost predstavlja činjenica da je u inverteru iz /55/ kao prekidački element korišćen GTO tiristor. Ovakvo rešenje napajanja SRM je efikasno i jeftino. Jedino pitanje je kolika je valovitost momenta na vratilu takvog motora. Podaci o tome nisu dati u tom radu.

Upravljanje SRM se ogleda u kontroli ugla uključenja prekidača invertora i u kontroli jačine struje kroz namotaj motora, a u skladu sa (4.20). Da bi se ugao uključenja prekidača precizno odredio neophodno je korišćenje senzora apsolutnog položaja rotora. *Sensorless* pogoni su takođe predloženi u literaturi /28/, ali su autori mnogo više skoncentrisani na problem valovitosti momenta /62/, odnosno na mogućnost da se adekvatnim upravljanjem ta valovitost

smanji ili eliminiše. U /62/ je primenjena *Space Vector* modulacija za kontrolu invertora, a u cilju eliminisanja oscilacija momenta.

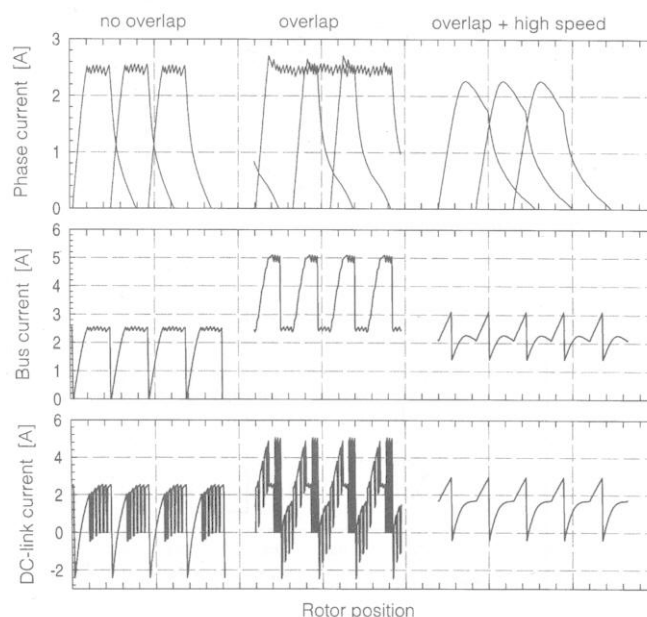
Valovitost momenta ne sme da se zanemari u projektovanju pogona za EV pošto može da dovede do preteranog naprezanja mehaničkih prenosnika snage i do njihovog preranog kvara. Budući da je broj faza SRM mali u odnosu na broj faza (lamela kolektora) u motoru jednosmerne struje, valovitost momenta predstavlja veliki problem. Metode za eliminaciju valovitosti na osnovu adekvatnog upravljanja se zapravo svode na PWM modulaciju upravljačkog signala tako da se motor ne napaja povorkom pravougaonih impulsa. Na Sl. 42. je prikazan primer iz /62/. Na prvom grafiku je prikazan talasni oblik promene induktivnosti u funkciji ugla zakrenutosti rotora. Na drugom grafiku je prikazan talasni oblik struje napajanja koji se postiže *Space Vector* modulacijom, a na trećem je oblik momenta svake faze SRM, kao i ukupan moment koji je konstantan.



Sl. 42. *Space Vector* modulacija za eliminaciju valovitosti momenta

Metod upravljanja u kojem se sinhrono sa promenom položaja rotora napajaju pojedine faze SRM sličan je vektorskom upravljanju sinusoidalno napajanih mašina. Da bi se izvršila regulacija momenta SRM u takvom pogonu ili da bi se napravio pogon sa upravljanjem koje je ekvivalentno DTC algoritmu neophodno je estimirati moment motora. Ovo je teško realizovati zbog valovitosti momenta usled koje ne postoji direktna zavisnost između struje i momenta. Da bi se rešio taj problem u /63/ je predložen metod estimacije momenta na osnovu izračunate magnetne energije akumulisane u mašini u toku jednog perioda. Za estimaciju se koriste samo informacije o struji i naponu napajanja motora.

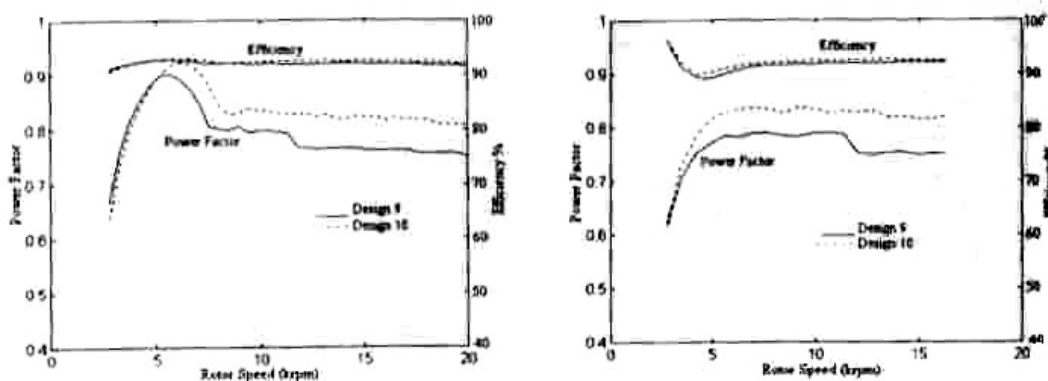
Rad u režimu slabljenja polja je najvažniji režim rada vučnog motora. Zbog dobrih svojstava SRM u tom režimu mnogi naučnici smatraju da će taj motor preuzeti primat u ovoj oblasti rada. Slabljenje polja se ostvaruje, slično SyRM, pomeranjem trenutka paljenja prekidača invertora unapred. Ovaj metod je primenjiv sve dok mašina ne postane neupravljljiva usled preklapanja faza. Oblici struja u nazivnom režimu rada, u režimu sa preklapanjem pri malim brzinama i u režimu sa preklapanjem pri velikim brzinama prikazani su u /61/ i na Sl. 43.



Sl. 43. Oblik struja pri radu u režimu konstantne snage

U raspoloživoj literaturi nije dat analitički izraz na osnovu kog bi se mogla odrediti maksimalna moguća brzina rada SRM. U /28/ je navedeno da je ta brzina 2 do 3 puta veća od nazivne. U /59/ je, međutim, dizajn motora optimizovan i sa aspekta širokog opsega brzina u oblasti oslabljenog polja. Rezultati koji su dobijeni govore u prilog SRM. Naime, maksimalna brzina za neke od motora bila je preko 7 puta veća od nominalne brzine. Ovo su motori sa užim i dužim polnim nastavcima. Treba pomenuti da su širine polnih nastavaka za 6-4 motore varirane u relativno uskim granicama od 30.31° do 36° , a za 8-6 motore u granicama od 19° do 21° . Iako su dimenzije polnih nastavaka varirane u relativno uskim granicama, opseg brzina u oblasti oslabljenog polja se kao posledica tih varijacija menjao u širokim granicama, od 3 do preko 7 nominalnih brzina.

Iako je prof. Ehsani u /28/ naveo da se rad u oblasti slabljenja polja odlikuje povećanjem gubitaka u motoru i pogoršanjem faktora snage, u kasnijem radu /59/ je grupa istraživača pod njegovim vodstvom došla do drugačijih zaključaka. Naime, kada se motor dizajnira sa ciljem da mu se omogući rad u oblasti konstantne snage onda on u tom režimu ima najbolje karakteristike. I faktor snage i stepen korisnog dejstva se povećavaju pri radu sa oslabljenim poljem, ali je faktor snage izuzetno nepovoljan u režimu rada sa konstantnim momentom, Sl. 44. Budući da su motori dizajnirani u /59/ predviđeni za stalan rad u režimu konstantne snage ovo ne predstavlja ograničenje za njihovu primenu.



Sl. 44. Faktor snage i stepen korisnog dejstva motora za rad u režimu konstantne snage sa nominalnim opterećenjem i pri preopterećenju

Još jedna specifičnost SRM sa poboljšanom karakteristikom u oblasti konstantne snage je saopštena u /59/. Kao i kod ostalih motora preopterećenost motora je u korelaciji sa širinom opsega konstantne snage, ali je nominalan moment motora sa većom maksimalnom brzinom manji nego kod motora uobičajene konstrukcije. Ni ovo ne ograničava primenljivost SRM u EV zbog toga što je i tako predviđeno da oni rade u režimu konstantne snage. Veoma značajan podatak za primenu u EV je činjenica da su se faktor snage i stepen korisnog dejstva vrlo malo menjali u uslovima preopterećenja mašine.

Treba pomenuti još jednu prednost istaknutu u /28/. Naime, ovi motori mogu da rade pri znatno višim temperaturama od radnih temperatura motora sa PM, pa čak i od asinhronog motora koji ima gubitke na rotoru.

I pored niza prednosti SRM koje se ističu u nizu radova, ovaj motor se za sada ne koristi u praktičnim realizacijama EV. To je verovatno posledica činjenice da se radi o relativno novoj tehnologiji koja još nije prihvaćena u industriji. Drugo objašnjenje je da se čekaju bolja rešenja problema valovitosti momenta i velike buke pri njegovom radu. Ograničenje mogućnosti primene nastaje i usled malog zazora koji je neophodan da bi se napravila mašina sa dobrim faktorom snage. Mali zazor može da stvara probleme pri eksploataciji EV zbog toga što u njemu može doći do zamrzavanja vodene pare iz atmosfere pri niskim temperaturama okoline, a to može da ima za posledicu blokiranje rotora.

4.4 Hibridni motori

Da bi se u električnoj mašini ostvarila elektromehanička konverzija energije, odnosno da bi se proizveo moment konverzije, potrebno je da se ostvari interakcija dva magnetna polja. Ovo se može ostvariti na nekoliko načina:

- interakcijom Teslinog obrtnog magnetnog polja statora i indukovano obrtnog magnetnog polja rotora asinhrona mašine,
- interakcijom obrtnog polja statora i polja stalnog ili elektromagneta rotora kod sinhronih i BLDC mašina,
- isto kao u prethodnom slučaju, ali se pobuda nalazi na statoru, a mehaničkim obrtanjem rotora se ostvaruje obrno magnetno polje kod klasičnih mašina jednosmerne struje i
- interakcijom obrtnog polja statora i isturenog (reluktantnog) rotora kod reluktantnih mašina.

Hibridne mašine su mašine kod kojih moment konverzije nastaje dejstvom više opisanih mehanizama. Na osnovu definicije je jasno da je klasa hibridnih mašina izuzetno široka. Već je napomenuto da u tu klasu spadaju i motori sa ugrađenim PM kod kojih postoji i reluktantna komponenta momenta. Među hibridne motore je moguće svrstati i sve varijante sinhronih motora sa kavezima za startovanje jer kod njih, bar tokom prelaznih procesa, postoji i asinhrona komponenta momenta.

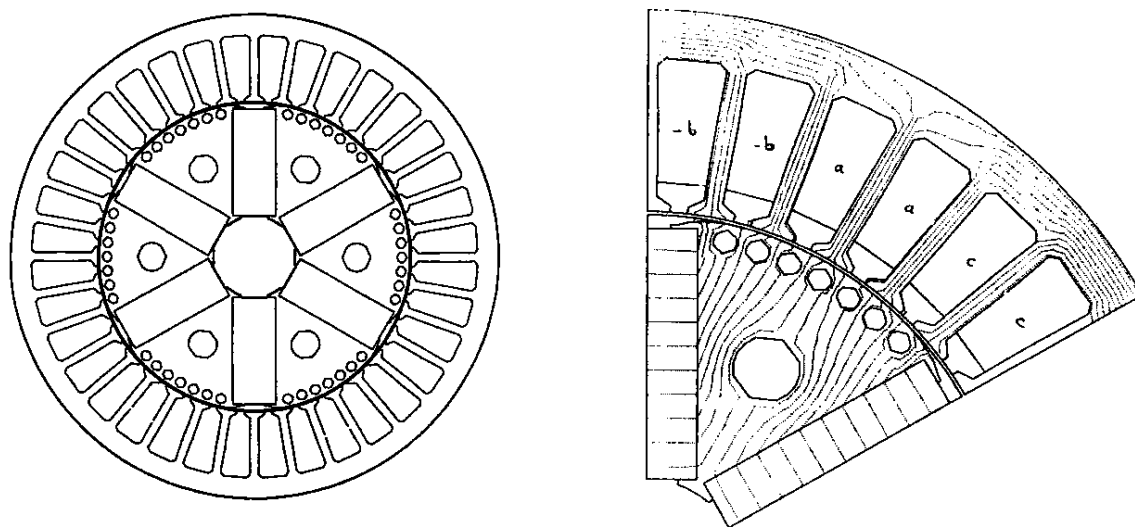
U ovom odeljku će ukratko biti prikazano nekoliko hibridnih konstrukcija koje se predlažu za upotrebu u EV. Do sada je pokazano da svaka od mašina ima svoje prednosti i mane u odnosu na ostale tipove. Hibridne konstrukcije nastaju sa ciljem da se ublaže ili eliminišu loša svojstva pojedinih tipova mašina i da se iskoriste dobra svojstva. Ovo je naročito bitno kod motora za primenu u EV i HEV jer se pred njih postavljaju strogi i često protivrečni zahtevi.

Hibridni motori koji se primenjuju u EV ili se preporučuje njihova primena u EV, uglavnom su kombinacije motora sa PM i reluktantnih motora. Moment konverzije takvih motora ima dve komponente koje ne moraju podjednako da doprinose momentu konverzije. Upravo zbog toga se neki hibridni motori ubrajaju u motore sa PM, a drugi u reluktantne motore. Ovo može da dovede do toga da ovde budu opisani i motori koji po drugim autorima ne spadaju u hibridne. Osnovni argument po kojem je neki motor uvršten u ovu grupu je izraz za moment konverzije koji sadrži više komponenti. Drugi kriterijum bi bila konstrukcija motora

koja obuhvata postojanje stalnog magneta i isturenosti polova ili sličnu kombinaciju konstruktivnih elemenata.

4.4.1 Motori sa PM i reluktantnom komponentom momenta

Prvi predstavnik ove klase hibridnih motora bi bio sinhroni motor sa ugrađenim PM. Poprečni presek ovog motora prikazan je na Sl. 23 b). Druga izvedba ovakvog motora je sa radijalno postavljenim PM kao na preseku sa Sl. 45. Suštinskih razlika između ove dve konstrukcije motora nema. U oba slučaja postoje komponenta momenta koja potiče od fluksa PM i reluktantna komponenta momenta.



Sl. 45. Poprečni presek PMSM sa ugrađenim radijalnim PM

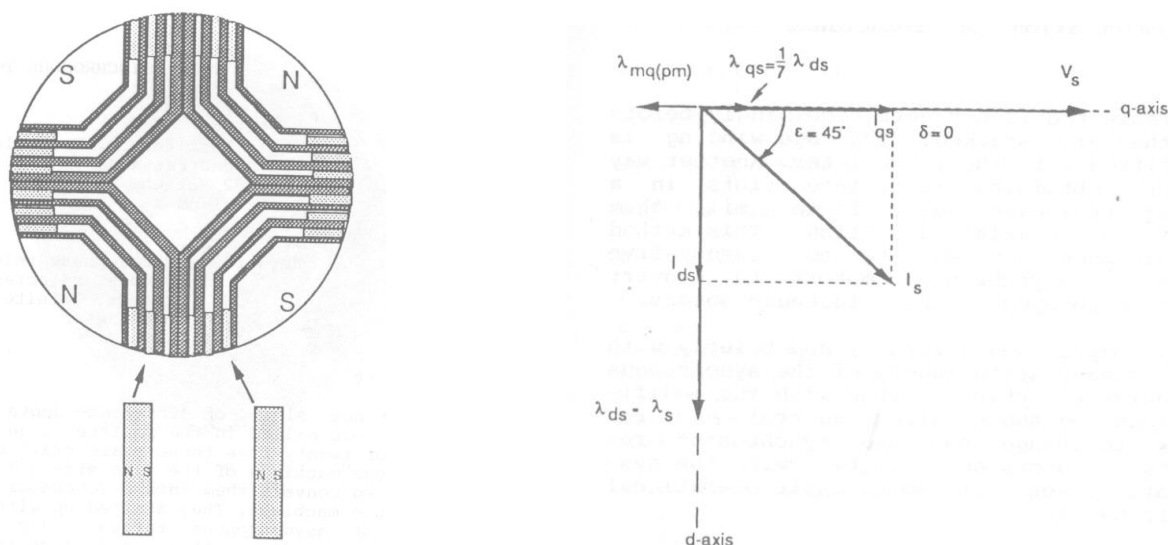
Momentna karakteristika motora prikazana je na Sl. 28, a izraz za moment je dat relacijom (4.17). Prednosti ove konstrukcije su veća mehanička čvrstoća rotora i veći količnik maksimalne i nominalne brzine motora. Ovo povećanje opsega nastaje zbog mogućnosti da se sa povećanjem brzine značajno smanji odgovarajući moment mašine i da se na taj način obezbedi rad sa konstantnom snagom. Odnos maksimalne i minimalne brzine za mašine sa ugrađenim PM dostiže vrednost od 3:1.

Sinhroni motor sa PM, međjutim, nije pravi predstavnik hibridnih konstrukcija pošto su male razlike podužne i poprečne induktivnosti, a ni konstrukcija statora i rotora nije izmenjena, tako da se poveća njihova isturenost. Prednosti reluktantnih mašina u odnosu na one sa PM su njihova jednostavnost, robusnost, niža cena i, naravno, širi opseg brzina u području konstantne snage. Da bi se ovo što više iskoristilo, a da se pri tome poboljša stepen korisnog dejstva, faktor snage i specifična snaga reluktantnih mašina primenjuju se hibridna rešenja.

Zanimljivo rešenje je predstavljeno u [45]. U doslovnom prevodu sa engleskog takav motor se zove: sinhroni reluktantni motor potpomognut PM⁵. Poprečni presek takvog motora prikazan je na Sl. 46. On je po svojoj konstrukciji sinhroni reluktantni motor sa aksijalnom laminacijom i sa PM ugrađenim u prostor predviđen za smeštaj nemagnetnih limova.

Šta se postiže ugradnjom PM može se objasniti na osnovu izraza za moment $SyRM$ (4.22). Očigledno je da poprečna komponenta fluksa umanjuje vrednost momenta. Kada bi L_{qs} bilo jednako nuli, proizvedeni moment bi imao najveću moguću vrednost. Poništavanje poprečne komponente fluksa u mašini je cilj ugradnje PM. Oni su stoga ugrađeni i orijentisani tako da stvaraju fluks u poprečnoj osi.

⁵ Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor



Sl. 46. Poprečni presek sinhronog reluktantnog motora potpomognutog PM i njegov fazorski dijagram

Najveći deo fluksa je orijentisan duž podužne ose ($L_{ds} > L_{qs}$), tako da PM ne moraju da stvaraju veliki fluks. Ovo znači da se karakteristike mašine značajno popravljaju upotrebom male količine PM. Konačan izraz za moment konverzije dat je relacijom (4.26).

$$m = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot (L_{ds} - L_{qs}) \cdot i_{ds} \cdot i_{qs} - \Phi_{PM} \cdot i_{ds} \quad (4.26)$$

Ugradnja PM u SyRM ima za posledicu i poboljšanje faktora snage. Na Sl. 46. je prikazan slučaj sa najnepovoljnijim faktorom snage. On odgovara radu sa maksimalnim momentom za odgovarajuću struju motora. Kada se uzme u obzir da je moguće koristiti manju podužnu komponentu struje za stvaranje istog momenta, jer je kompenzovan uticaj poprečne komponente fluksa, jasno je da faktor snage može da dostigne vrlo visoke vrednosti. Ovo se povoljno odražava na dimenzionisanje invertora, a samim tim i na cenu samog pogona. Istovremeno je, sa smanjenjem statorske struje, povećana efikasnost i preopteretivost mašine, a i opseg brzina.

U dostupnoj literaturi nije naveden podatak o odnosu maksimalne i nominalne vrednosti brzine za ovakvu konstrukciju mašine. Realna je pretpostavka da je taj odnos sličan kao i za PMSM sa ugrađenim magnetima. Prednosti ovog motora u odnosu na PMSM prvenstveno treba tražiti u njegovoj nižoj ceni, povećanoj robusnosti i većoj bezbednosti u eksploataciji. Jedna od prednosti je i činjenica da ovaj motor može da radi i ako dođe do demagnetizacije PM. Naravno, njegove performanse bi bile narušene, ali sasvim dovoljne da se EV i dalje kreće.

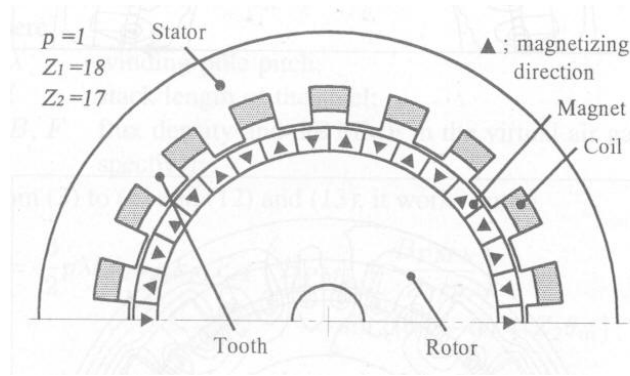
Da bi se iskoristile prednosti SRM, kao što su mogućnost rada sa kvarom u jednoj fazi, širok opseg brzina, jeftiniji, unipolarni, invertori i slično, u [2] je prikazan hibridni motor koji je konstruisan kao SRM, ali su na polove rotora ugrađeni i PM. Motor prikazan u [2] odlikuje se i aksijalnom raspodelom fluksa. Ta karakteristika će biti obrađena u tački 4.5.2.

U slučaju ovog motora stalni magneti stvaraju fluks u pravcu podužne ose. Cilj je da se poveća vrednost momenta konverzije i efikasnosti tako što će se povećati vrednost fluksa u mašini. Kod hibridne konstrukcije se upotrebljava manja količina PM tako da se dobijaju jeftiniji motori sa podjednako dobrim karakteristikama.

4.4.2. Vernijeov sinhroni motor sa površinski montiranim PM

Vernijeov sinhroni motor se obično obrađuje kao mašina sa PM. U ovom radu je uvršten u hibridne mašine zbog toga što se konstrukcija odlikuje isturenošću njegovog statora i mehanizam stvaranja momenta konverzije nije prost kao kod običnih mašina sa PM.

Ovaj motor uspostavlja izuzetno visoku vrednost momenta na malim brzinama. To je omogućeno zanimljivom pojavom koja se naziva "efektom magnetnog uzupčenja"⁶. Vernijeova mašina je konstruisana sa velikim brojem polova PM na rotoru i sa isturenim zupcima na statoru. Poprečni presek Vernijeove mašine prikazan je na Sl. 47.

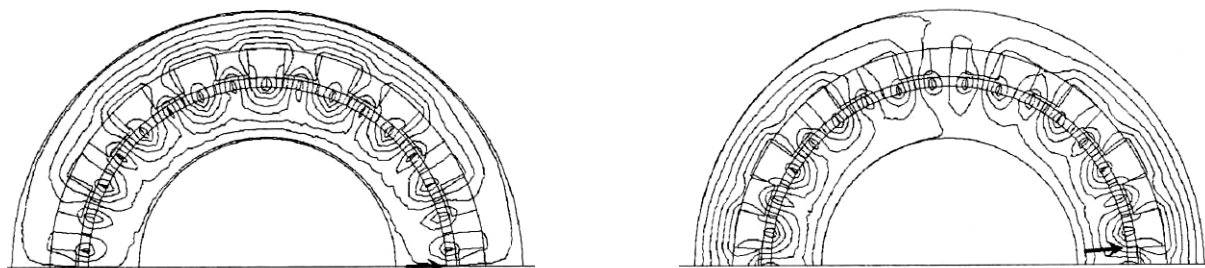


Sl. 47. Poprečni presek Vernijeovog motora sa površinski montiranim PM

Da bi došlo do "magnetnog uzupčenja" potrebno je da broj pari polova namotaja statora p , broj zuba statora Z_s i broj polova rotora Z_r budu povezani u skladu sa relacijom (4.27) /68/.

$$Z_r = Z_s \pm p \quad (4.27)$$

Na Sl. 48. je prikazana raspodela magnetnog fluksa za dva bliska položaja rotora. Iako je rotor zakrenut samo za $\frac{1}{4}$ širine zupca statora, magnetni fluks u mašini se zakreće za 90° (električnih). Pošto je broj polova rezultujućeg fluksa jednak broju polova statorskog namotaja, odnosno statorske magnetomotorne sile, njihovom interakcijom dolazi do stvaranja konstantnog momenta konverzije /68/. Posledica činjenice da mala promena položaja rotora izaziva veliku promenu položaja resultantnog fluksa je "magnetno uzupčenje".



Sl. 48. Promena u raspodeli fluksa sa promenom položaja rotora (strelica pokazuje pravac ose rotora)

U /68/ je pokazano da je, s obzirom na više harmonike fluksa i magnetomotorne sile, povoljnije izabrati konstrukciju sa manjim brojem polova rotora od broja zuba na statoru. Osim ovoga u /68/ se može pronaći čitava metodologija za projektovanje ovih motora sa ciljem da se maksimizuje proizvedeni moment.

Bez preciznih podataka o karakteristikama ove mašine i njenom upravljanju može se ustvrditi samo da se radi o mašini čije karakteristike najviše dolaze do izražaja pri malom broju obrtaja. Ovakvi motori se, zahvaljujući tom svojstvu, mogu primeniti za konstrukciju direktnog vučnog pogona EV (bez reduktora). Evidentno je i da se, kao i kod drugih motora sa PM, radi o

⁶ Engleski: "magnetic gearing effect"

visoko efikasnoj mašini, utoliko pre što u ovoj mašini viši harmonici fluksa i mms stvaraju konstantan fluks koji se može iskoristiti za pojačanje momenta konverzije /68/.

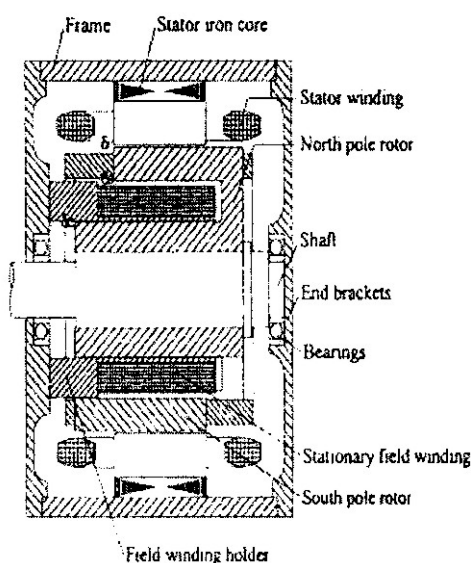
Karakteristike Vernijeovog motora u oblasti slabljenja polja nisu obrađene u dostupnoj literaturi. U slučaju da je mali odnos maksimalne i minimalne brzine što se može očekivati od mašine sa PM, ovaj motor može naći primenu u EV i HEV pošto ostalim dobrim svojstvima može da kompenzuje eventualno ograničenje u pogledu režima rada sa oslabljenim poljem.

4.4.3 Hibridni motor sa PM i pomoćnom pobudom

U cilju proširenja opsega brzina u režimu konstantne snage na Univerzitetu u Hong Kongu je razvijen hibridni motor sa PM i pomoćnom pobudom /7/. Princip rada ovog motora sastoji se u sledećem. PM koji se ugrađuje na rotor obezbeđuje minimalnu pobudu za rad motora. Maksimalan fluks u motoru nastaje kao zbir fluksa PM i pomoćnog pobudnog namotaja. Pomoćni pobudni namotaj se koristi samo u režimu konstatnog momenta, a i tada je struja u tom namotaju manja nego što bi bio slučaj da nema PM u mašini. Čim je manja struja pobude manji su i gubici u pobudnom namotaju.

Dodatnom smanjenju gubitaka u pobudnom namotaju, a samim tim i povećanju efikasnosti, doprinosi i činjenica da vučni motor u EV uglavnom radi u režimu konstantne snage, a tada se struja pobudnog namotaja dodatno smanjuje ili se čak isključuje.

Da bi se sačuvala jednostavnost konstrukcije motora sa PM koja se ogleda u tome da ne postoje četkice i klizni prstenove, pomoćni pobudni namotaj smešten je na stator kao što se vidi sa Sl. 49.



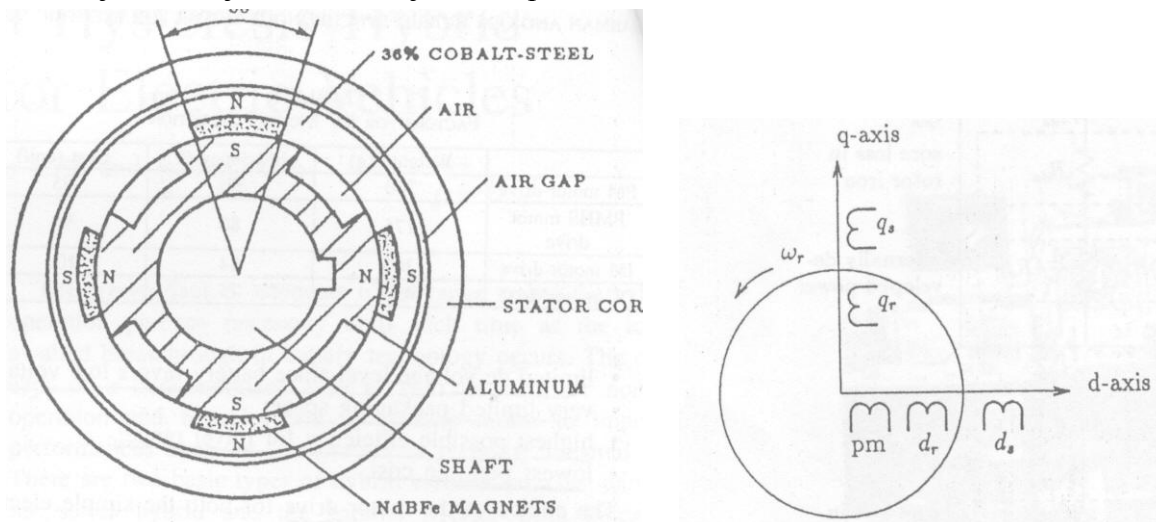
Sl. 49. Podužni presek hibridnog motora sa PM i pomoćnom pobudom

Napajanje pomoćnog pobudnog namotaja se obavlja jednosmernom strujom tako da se on namagnetiše kao što je prikazano na slici. Pošto su severni i južni pol rotora aksijalno pomereni, i fluks severnog i južnog pola pobude se nezavisno zatvara kroz te polne nastavke.

Skoro sva svojstva ovog hibridnog motora odgovaraju svojstvima sinhronne mašine sa električnim pobuđivanjem. Najznačajnije razlike su povećana efikasnost motora i eliminacija četkica. Pa ipak, ostaje potreba za postojanjem dodatnog izvora za napajanje pobude i regulacionog kola za taj izvor. Nedostatak je i složena konstrukcija rotora i statora ovog motora. Utisak je da će zbog svih tih nedostataka ovo rešenje ostati samo jedan od avangardnih predloga koji nikada neće biti prihvaćen u industriji.

4.4.4. Histerezisni hibridni motor sa PM

U [66] je opisan još jedan zanimljiv hibridni motor. Histerezisni motor je sam po sebi hibrid. Njegov moment konverzije ima asinhronu i reluktantnu komponentu. Rad histerezisnog motora povezan je sa velikim gubicima u rotoru. Gubici nastaju usled magnetnog histerezisa i vrtložnih struja. Da bi se povećala efikasnost ovog motora neophodna je primena PM u njegovoj konstrukciji. Na ovaj način se dobija hibrid prikazan na Sl. 50.



Sl. 50. Poprečni presek histerezisnog hibridnog motora sa PM i njegov model u dq području

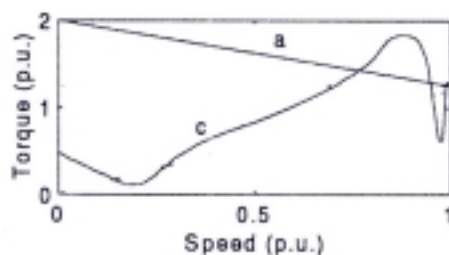
Kao što se vidi sa slike, stator histerezisnog hibridnog motora je cilindričan sa raspodeljenim namotajem (kao kod asinhrona i sinhrona mašine). Rotor je konstruisan pomoću histerezisnog cilindra od 36% kobaltnog čelika. PM su ugrađeni u žlebove na unutrašnjem prečniku histerezisnog cilindra koji je oslonjen na nemagnetni, aluminijumski nosač. U aluminijumskom nosaču su ostavljene šupljine koje služe da potpomognu hlađenje rotora.

Magnetni fluks je radijalan u vazдушnom zazoru, a kroz histerezisni prsten se zatvara po njegovom obimu. Kao posledica postojanja fluksa u rotoru, nastupa zasićenje pojedinih delova histerezisnog prstena. Ovo doprinosi stvaranju reluktantne komponente momenta konverzije. Osim nje, tokom asinhronog rada, u mašini postoji i asinhroni moment koji je posledica indukovanih vrtložnih struja. Poslednja komponenta momenta je sinhroni moment polja PM. Izraz za moment (4.28) se izvodi na osnovu modela motora u dq području.

$$m = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \left[(L_{ds} - L_{qs}) \cdot i_{ds} \cdot i_{qs} + L_{md} \cdot (i_{2dh} + i_{pm}) \cdot i_{qs} - L_{mq} \cdot i_{2qh} \cdot i_{ds} \right] \quad (4.28)$$

Oznake upotrebljene u prethodnom izrazu imaju sledeća značenja: p - broj pari polova, L_{ds} , L_{qs} - d i q komponente induktivnosti statora, L_{md} , L_{mq} - d i q komponente induktivnosti magnećenja, i_{ds} , i_{qs} - d i q komponente statorske struje, i_{pm} - magnetizaciona struja PM i i_{2dh} , i_{2qh} - ekvivalentne histerezisne struje po d i q osi.

U asinhronom radu ovaj motor se odlikuje velikim gubicima kao i histerezisni motor bez PM. Međutim, ovaj nedostatak je kompenzovan dobrim momentom konverzije u asinhronom radu. Naime, PM motori imaju slabe karakteristike u prelaznim režimima. Ovo se može videti sa grafika prikazanog na Sl. 51. Na tom grafiku brzina od 1 r.j. odgovara sinhronoj brzini obrtnog magnetnog polja. Prikazani su moment hibridnog histerezisnog motora i motora sa PM.



Sl. 51. Moment hibridnog histerezisnog motora (a) i motora sa PM (c) u toku ubrzavanja

Upravljačko kolo vučnog pogona EV može da ima funkciju soft-starta. Bez obzira na to uslovi eksploatacije su takvi da uslovljavaju pojavu velikog broja prelaznih režima, a i nagib soft starta mora da bude velik kako se ne bi narušila dinamika pogona. U svim prelaznim režimima dolazi do asinhronog rada. Sinhronizacija motora sa PM se odlikuje lošijom dinamikom, oscilacijama momenta i pojačanom bukom u odnosu na histerezisni hibridni motor. Upravo zbog dobrih karakteristika histerezisnog hibridnog motora u prelaznim režimima, on se u /66/ preporučuje za primenu u EV.

Najpovoljnija strategija upravljanja ovim motorom je vektorsko upravljanje. Pošto polje u mašini obezbeđuje PM, za magnetizacionu, d komponentu struje se zadaje nulta vrednost. Moment se kontroliše upravljajući q komponentom struje. Da bi se ostvarilo ovakvo upravljanje potrebno je imati informaciju o položaju rotora u svakom trenutku. Dakle, sa aspekta upravljanja ova mašina nema prednosti u odnosu na druge sinhronne mašine.

4.5. Geometrija savremenih motora

U poglavlju 2.3 su prodiskutovane specifičnosti konstrukcije EV. Ukazano je, ne samo da postoji mogućnost za specifičnu konstrukciju EV u odnosu na automobile sa motorom SUS, nego je to i neophodno da bi se poboljšale karakteristike tih vozila. Ako se koriste pogonski sistemi prikazani na Sl. 4. b) i c) neophodno je konstruisati motore koji po svojim dimenzijama mogu da se uklope u prostor ispod poda vozila ili u prostor blatobrana. U prvom slučaju, kada motor treba postaviti ispod poda, na mesto na kome se inače nalazi mehanički diferencijal, motor može da ima dimenzije i oblik sličan klasičnom obliku električnih mašina. Međutim, tada on mora da bude konstruisan sa dvostrukim rotorom. Jedna izvedba takvog motora prikazana je u tački 4.1.2.

U nekim aplikacijama sličnog tipa, mada o tome nema nagoveštaja u dostupnoj literaturi, može da se predvidi upotreba izduženih motora, odnosno motora sa malim prečnikom rotora i velikom dužinom paketa limova. Ovakve konstrukcije se javljaju u primenama kod kojih se zahteva veliko ubrzanje pogona i rad sa izuzetno velikim brzinama. Takva konstrukcija bi bila pogodna za smeštaj ispod poda vozila, ali bi se javio problem sa hlađenjem koji je povezan sa velikom dužinom paketa limova.

Drugi pristup je izrada motora koji su namenjeni ugradnji u točak vozila. U tački 2.3.2 ukratko je pomenuta ova mogućnost i prikazani su preseki dva takva motora. U tački 4.5.1 će biti detaljnije prikazano nekoliko klasičnih varijanti konstrukcije motora u točku. Međutim, motori u točku, ali i motori sa dvostrukim rotorima se uglavnom konstruišu kao mašine sa aksijalnim (transverzalnim) fluksom. Ovoj izuzetno širokoj i aktuelnoj grupi motora posvećena je tačka 4.5.2.

4.5.1 Motori u točku - "klasične" konstrukcije

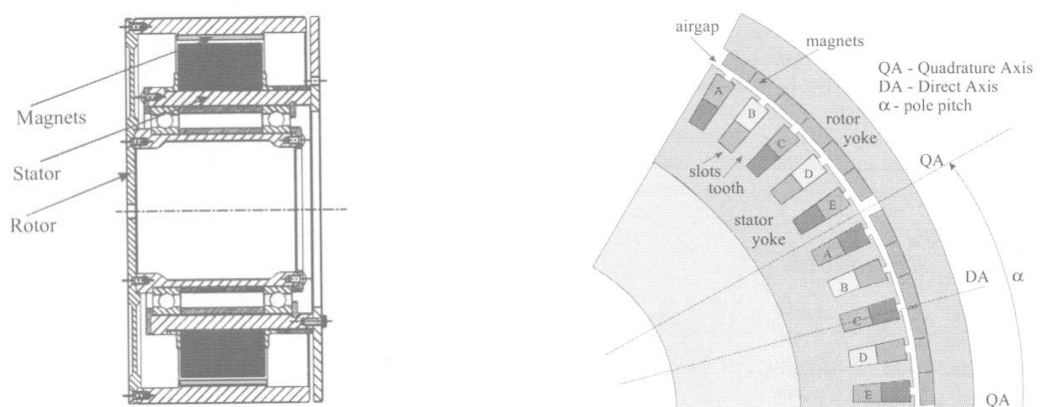
Da bi mogli da se smeste u prostor blatobrana i da budu direktno spregnuti sa točkom ovi motori moraju da budu male dužine. Radi se o sporohodnim motorima. Kako je to istaknuto u /71/ i /72/ za brzine od oko 120 km/h brzina direktno spregnutog motora iznosi oko 1500 o/min,

dok je u /69/ taj odnos malo drugačiji (veći prečnik točka) tako da brzini motora od 1540 o/min odgovara brzina od 180 km/h . Druga karakteristika koju moraju da zadovolje direktno spregnuti motori je velik moment motora. Da bi imali upravo takve karakteristike, ovi motori se izrađuju sa velikim prečnikom.

Bilo koji od opisanih tipova motora može da se izradi u ovakvom obliku. Ipak, neke osobine utiču na to da se kao motori u točku uglavnom javljaju motori sa PM. U /69/ se navodi da je asinhroni motor nepovoljan i zbog toga što bi se na osnovu gubitaka u rotoru dodatno zagrevale gume vozila što može da ima nepovoljan uticaj na njihov vek trajanja i vozne karakteristike. Druga prednost motora sa PM u odnosu na asinhroni je njegova kompaktnija konstrukcija i manja masa za iste karakteristike. Ovo je izuzetno značajno jer je veliki problem obezbediti dobro vešanje i naleganje točka na put ako je on velike mase, a u ovom slučaju u masu točka spada i masa motora.

Jedna od varijanti da se konstruiše lagan i kompaktan motor u točku pomenut je u 2.3.2 i prikazan je na Sl. 3. a). Radi se o brzohodnom motoru koji je smešten u točak, ali prenos snage nije direktan već se koristi planetarni reduktor. Upotreba bilo kakvog prenosioca povezana je sa pojavom mehaničkih gubitaka u njemu. Ovo narušava ukupnu efikasnost sistema i zbog toga se uglavnom koriste motori sa direktnim prenosom.

Pod "klasičnom" konstrukcijom motora u točku podrazumeva se konstrukcija sa radijalnom raspodelom fluksa u mašini. Takav motor prikazan je i na Sl. 3. b) i u /69/. U tom slučaju se radi o sinhronom motoru sa PM, a u /43/ je opisan BLDC motor prikazan na Sl. 52.



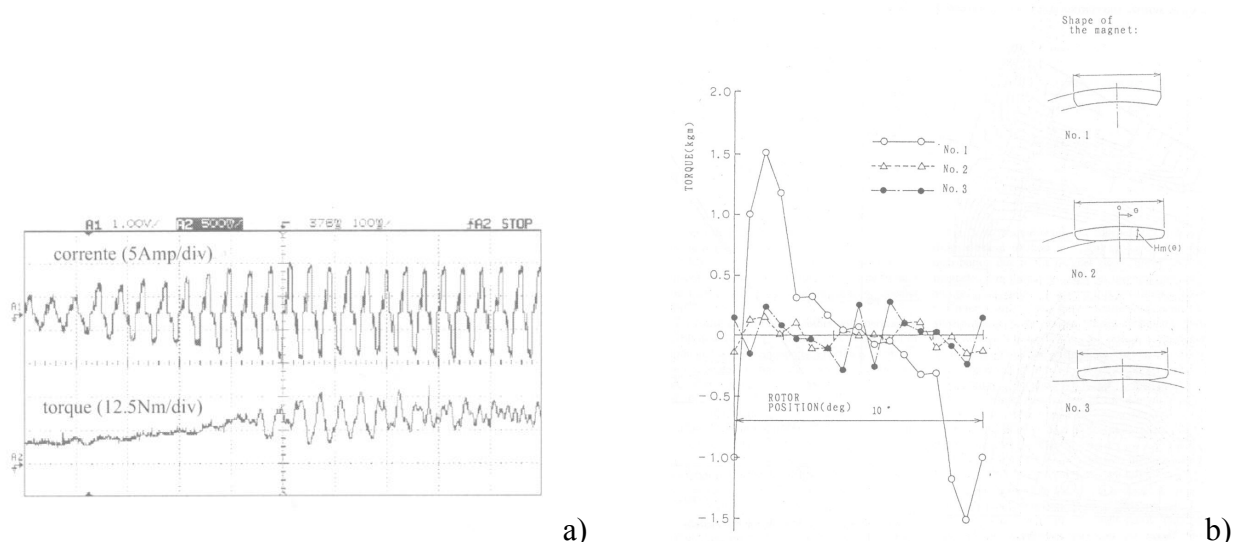
Sl. 52. Podužni i deo poprečnog preseka BLDC motora za ugradnju u točak EV

Motor sa Sl. 52. je petofazni BLDC sa spoljašnjim rotorom. Autori rada navode da su prednosti konstrukcije sa radijalnim fluksom to što je moguće postići veći intenzitet magnetnog fluksa u zazoru mašine zahvaljujući boljoj magnetnoj provodnosti paketa limova i to što se koriste PM klasičnog, pravougaonog, oblika. Ovakvi PM su jeftiniji i jednostavniji za upotrebu.

U vezi sa ovim motorom navedeno je da se prilikom njegove konstrukcije naročito vodi računa o zagrevanju kako usled njega ne bi došlo do demagnetizacije PM. Osim toga, posebna pažnja je posvećena i intenzivnim vibracijama kojima je izložen ovaj motor i koje takođe mogu da imaju za posledicu demagnetizaciju PM. Ove opasnosti se javljaju kod svakog motora sa PM koji je namenjen za ugradnju u točak. Pored već pomenutih problema u vezi sa mehaničkom konstrukcijom motora pomenuti su i opasnost od prodora tečnosti, prašine i drugih stranih tela u motor kao i o aksijalnim silama koje on trpi. Ovi nepovoljni mehanički uslovi su vezani za ugradnju bilo kojeg tipa motora u točak.

Konstrukcija BLDC motora sa pravougaonim žlebovima i PM ima za posledicu pojavu harmonika magnetnog fluksa i magnetomotorne sile kao i stvaranje valovitog momenta. Klasičan postupak za smanjenje valovitosti momenta je uvrtnje magnetnih polova motora. Taj

postupak je primenjen i kod ovog motora. U /43/ je referisano da je i pri određivanju vrednosti za koju će se usukati magnetni polovi neophodno sprovesti optimizacioni postupak jer uvrtnanje polova smanjuje kontra ems i povećava omski otpor, a može se delimično kompenzovati smanjenjem razmaka među žlebovima. Sudeći po Sl. 53. a) valovitost momenta je poprilična i pored primenjenog uvrtnanja polova. Iako je kod motora u točku izbegnuta upotreba mehaničkih prenosnika, valoviti momenti mogu dodatno da opterećuju vezu motora sa elementima vešanja tako da smanjenju valovitosti treba posvetiti odgovarajuću pažnju.



**Sl. 53. a) Talasni oblik struje i momenta BLDC motora,
b) Zavisnost valovitosti momenta od oblika PM kod sinhronog motora iz /69/**

Kod sinhronog PM motora iz /69/ smanjenje valovitosti momenta je izvedeno primenom PM promenljive debljine. Oblici PM i odgovarajuće krive momenta u funkciji od ugla zakrenutosti rotora prikazani su na Sl. 53. b). Prilikom konstruisanja PM potrebno je ostvariti raspodelu polja u mašini koja je približno harmonična. Zbog toga se najbolji rezultati postižu sa oblikom PM broj 2 čija se debljina menja po sinusnom zakonu. Pokazano je, međutim da se dobri rezultati ostvaruju i primenom linearizovanog oblika magneta (oblik 3) koji je znatno jednostavniji za izradu.

U ovom slučaju uvrtnanje magnetnih polova motora nije primenjeno usled toga što se radi o motoru velikog prečnika i male dužine pa bi takav pristup bio komplikovan i neefikasan. Da bi se primenom PM promenljive debljine smanjila valovitost momenta motora neophodno je koristiti inverter koji na izlazu daje sinusoidalnu struju. Sve ovo usložnjava konstrukciju vučnog pogona, ali omogućava konstrukciju sa boljim performansama nego što je slučaj sa BLDC motorom.

Osnovno pitanje kod motora sa velikim prečnikom rotora je koji broj polova treba usvojiti. U /69/ je napomenuto da suviše mali broj polova motora ima za posledicu suviše komplikovan proces proizvodnje jer bi svaki PM bio većih dimenzija, jaram magnetnog kola bi bio deblji pa bi se povećao i prečnik motora čime bi se povećale i dimenzije glave namota, kao i njegova dužina motora što bi imalo za posledicu da se povećaju rasipna induktivnost i gubici u bakru. Kada bi se usvojio preterano velik broj polova to bi imalo za posledicu preterano povećanje učestanosti izvora što bi dovelo do povećanja gubitaka u gvožđu, a komplikovalo bi i upravljanje inverterom. U toku optimizacije broja polova treba voditi računa i o komutacionim gubicima u inverteru koji rastu sa učestanošću.

U oba razmatrana primera radi se o motorima sa 12 polova. Tako velikom broju polova treba zahvaliti za kompaktnu konstrukciju ovih motora i njihov veliki moment. Konstrukcija

motora sa velikim prečnikom rotora, ali malim brojem polova ne bi imala značajnih prednosti u odnosu na klasične konstrukcije motora.

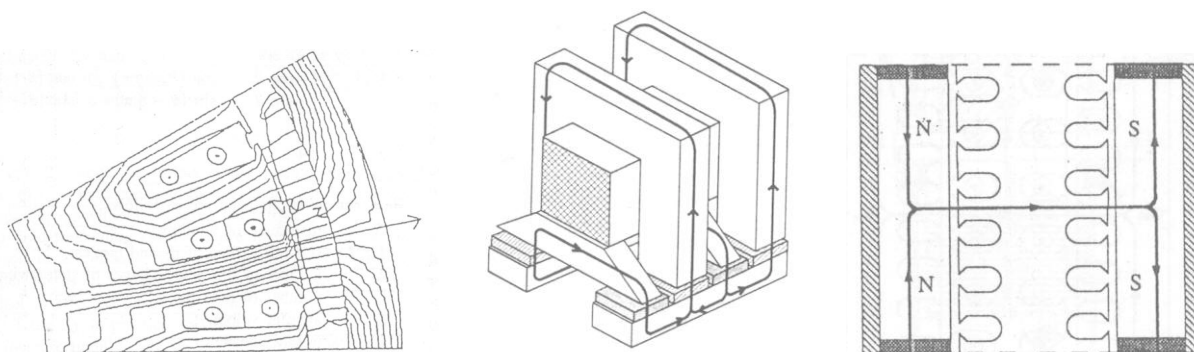
Što se tiče efikasnosti, oba pogona se odlikuju ukupnim stepenom korisnog dejstva od preko 92%. Ovako velika efikasnost delimično je posledica činjenice da je izbegnuta upotreba mehaničkog prenosnika snage. Drugi razlog je visoka efikasnost motora sa PM. U /69/ je pokazano da pogon ima izuzetno dobar stepen korisnog dejstva i u režimu slabljenja polja, ali treba imati u vidu da je u ovom slučaju na taj način moguće uvećati maksimalnu brzinu svega za dvadesetak procenata. Kao što je diskutovano u odeljku 4.4, motorima sa PM se, uz upotrebu senzora ili *sensorless* algoritama, upravlja tako da je faktor snage jednak jedinici u režimu rada motora sa konstantnim momentom. Ovo ima za posledicu da je za napajanje motora potreban inverter manje snage nego za pogon asinhronog motora iste snage.

U /69/ su prikazane vrlo značajne međuzavisnosti motora, invertora i akumulatora kao i njihov uticaj na vučnu karakteristiku. Analiza celokupnog vučnog pogona nije predmet ovog rada, ali je vrlo značajno još jednom podvući da je to vrlo složen interdisciplinarni problem.

4.5.2 Motori sa transverzalnim i aksijalnim fluksom

Motori sa transverzalnim i aksijalnim fluksom su se pojavili krajem osamdesetih godina dvadesetog veka /70, 71/. Obe topologije imaju za cilj da se smanji dužina magnetnog kola kroz koje se prostire magnetni fluks u mašini. Time se povećava intenzitet magnetne indukcije u vazдушnom zazoru.

Iako se nazivi ovih mašina odnose na pravac prostiranja magnetnog fluksa oni opisuju različite karakteristike mašina. Naime, transverzalne mašine imaju transverzalan pravac prostiranja fluksa u magnetnom kolu, dok se pridev aksijalan odnosi na fluks u zazoru aksijalnih mašina. Klasične električne mašine se odlikuju fluksom koji se u magnetnom zazoru prostire radijalno, a u magnetnom kolu longitudinalno (cirkumferencijalno). Kod mašina sa transverzalnim fluksom, on u zazoru može da bude radijalan (najčešće) ili aksijalan (na primer mašina iz /73/) dok je u magnetnom kolu on usmeren u transverzalnom (aksijalnom) pravcu. Za razliku od toga, mašine sa aksijalnim fluksom zadržavaju taj pravac fluksa u zazoru, a u magnetnom kolu on može da bude transverzalan ili longitudinalan. Na Sl. 54. su prikazani preseki klasične i mašina sa transverzalnim i aksijalnim fluksom.



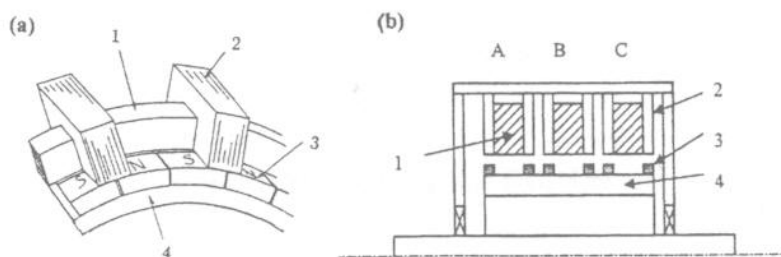
Sl. 54. Poređenje toka magnetnog fluksa u klasičnoj i mašinama sa transverzalnim i aksijalnim fluksom

Konstruktivne razlike ovih mašina mogu se videti i sa Sl. 54. Namotaji kod klasičnih mašina su aksijalni dok su kod mašina sa transverzalnim fluksom cilindrični, a kod mašina sa aksijalnim fluksom su radijalni. Detalji u vezi sa konstrukcijom i karakteristikama pojedinih motora biće opisani u nastavku.

Motori sa transverzalnim fluksom u dostupnoj literaturi nisu okarakterisani kao naročito pogodni za primenu u električnim vozilima, ali se navode karakteristike koje na to upućuju. U /31/ i /70/ se tvrdi da su ovi motori sa izuzetno velikom gustinom snage i momenta. Osnovni razlog je već naveden, a to je kratak put fluksa kroz magnetno kolo mašine. Smanjenjem

magnetnog kola smanjuje se masa, ali i gubici u mašini. Dobija se efikasna i lagana konstrukcija mašine, a to su bitne karakteristike za primenu u EV. Osim toga namotaj ovog motora je cilindričan pa je jednostavan za izradu.

Po prirodi svog rada, ovi motori mogu da budu relukantni ili sa PM. U /31/ je navedeno da se ovim motorom upravlja kao sa BLDC motorom, ali se može pretpostaviti da je moguće koristiti ih i kao sinhronne mašine. Crteži monofaznog i višefaznog motora sa transverzalnim fluksom prikazani su na Sl. 55.



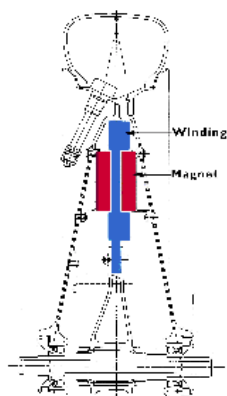
Sl. 55. Monofazni (a) i višefazni (b) motor sa transverzalnim fluksom

Motor sa transverzalnim fluksom je u osnovi monofazan motor. Obrtno polje nastaje modulacijom homopolarnog polja uz pomoć statorskih polova, tj. zubaca. Što je veći broj polova to je veći moment koji se stvara u mašini, a istovremeno se smanjuju i pulsacije momenta. Povećanje proizvedenog momenta za mašinu sa konstantnim prečnikom i strujom u namotaju, posledica je povećanja gustine struje, odnosno proizvoda $B_0 \cdot A$. Očigledno je da se ovi motori konstruišu sa velikim brojem polova.

U /70/ se može pronaći detaljniji opis konstrukcije ovih mašina i to obe varijante, sa jednostranim i dvostranim statorom. Svi detalji konstrukcije i postupka projektovanja nisu interesantni za ovaj tekst. U vezi sa konstrukcijom je potrebno napomenuti da se višefazni motori dobijaju ugrađivanjem većeg broja monofaznih modula. Ovo može da bude izuzetno korisno svojstvo za primenu u EV jer to znači da on, u slučaju kvara na nekoj od faza, može da nastavi sa radom i omogućiti da se završi započeto putovanje i/ili da se vozilo preveze do servisa. Najčešće se motori sa transverzalnim fluksom izrađuju u cilindričnom, "klasičnom", obliku, ali je moguća i konstrukcija u obliku diska kao što se vidi u /73/.

Motori sa aksijalnim fluksom su veoma popularni među konstruktorima EV ili bar među istraživačima na tom polju. Ovi motori su uvek konstruisani sa rotorom u obliku diska i najčešće se primenjuju za izradu motora u točku. Početak primene ove topologije motora je vezan za njihovu primenu u solarno pogonjenim vozilima čije se trke održavaju u cilju propagiranja novih tehnologija. I ovaj prikaz će započeti sa jednim motorom za solarno vozilo.

Motor u točku, ili motor/točak, solarnog vozila koje je učestvovalo na trci Darwin - Adelaide 1996. godine prikazan je u /72/. Radi se o *slotless* konstrukciji BLDC motora sa spoljašnjim rotorom. Presek ovog motora/točka i fotografija vozila u koje je ugrađen prikazani su na Sl. 56.

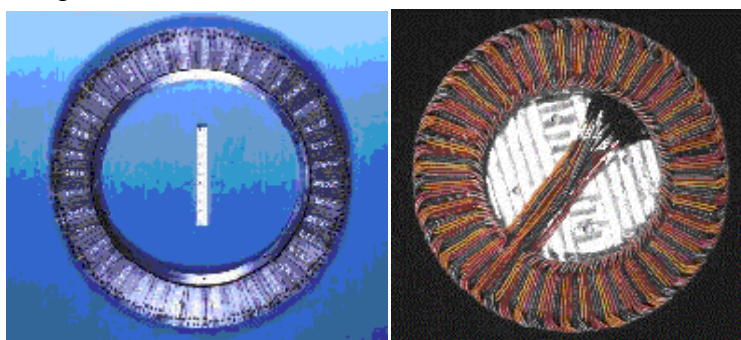


Sl. 56. Presek motor/točka solarnog vozila *Aurora* i fotografija vozila

Konstruisan je motor mase 5kg , koji ima snagu od 1.8kW i ukupne gubitke od 56W . Stepenn korisnog dejstva motora iznosi preko 97% , a specifičan moment iznosi 3.24Nm/kg , što je više nego duplo veća vrednost nego kod tipičnog asinhronog motora. Da bi se postigle ove performanse primenjena su sledeća konstruktivna rešenja:

- Izabrana je konstrukcija sa aksijalnim fluksom jer: ekvivalentna mašina sa radijalnim fluksom ima preveliku dužinu glave namota, ova konstrukcija omogućuje upotrebu dvostrukih magneta na rotoru (sa svake strane statora), statorski namot može da se montira centralno na osovinu i namotaj i magnetni diskovi su planarne konstrukcije.
- Iskorišćen je *slotless* namot na statoru (bez žlebova za smeštaj namotaja) sa sledećim prednostima: veća efikasnost jer nema gubitaka u zupcima koji ograničavaju efikasnost motora sa žlebovima na manje od 96% , i pored nedostatka magnetnog kola ostvarena je visoka vrednost magnetne indukcije zahvaljujući visokoenergetskim PM, više prostora je iskorišćeno za smeštaj namotaja čime su smanjeni gubici u bakru, gubici usled vrtložnih struja su smanjeni upotrebom finožičnog provodnika (*Litz*) za izradu namotaja.
- Upotreba statora bez feromagnetnog kola omogućila je minimizaciju mase za odgovarajući fluks u motoru i pri tome ima performanse kao i motor sa staklo metalnim statorom koji je znatno teži za izradu, a zadovoljavajuće su i toplotne karakteristike motora.

Rotor je izrađen bez upotrebe feromagnetnog materijala, ali sa magnetima u takozvanom *Halbach* rasporedu. Ovo znači da orijentacija PM nije upravna na površinu rotora već se za svaki pol koriste po četiri PM koji sa osom vratila zaklapaju uglove od 30° i 60° . Proračuni pokazuju da su na ovaj način gubici smanjeni za 20% , odnosno za 10W . Skica *Halbach* rasporeda PM i fotografije statora i rotora prikazani su na Sl. 57.



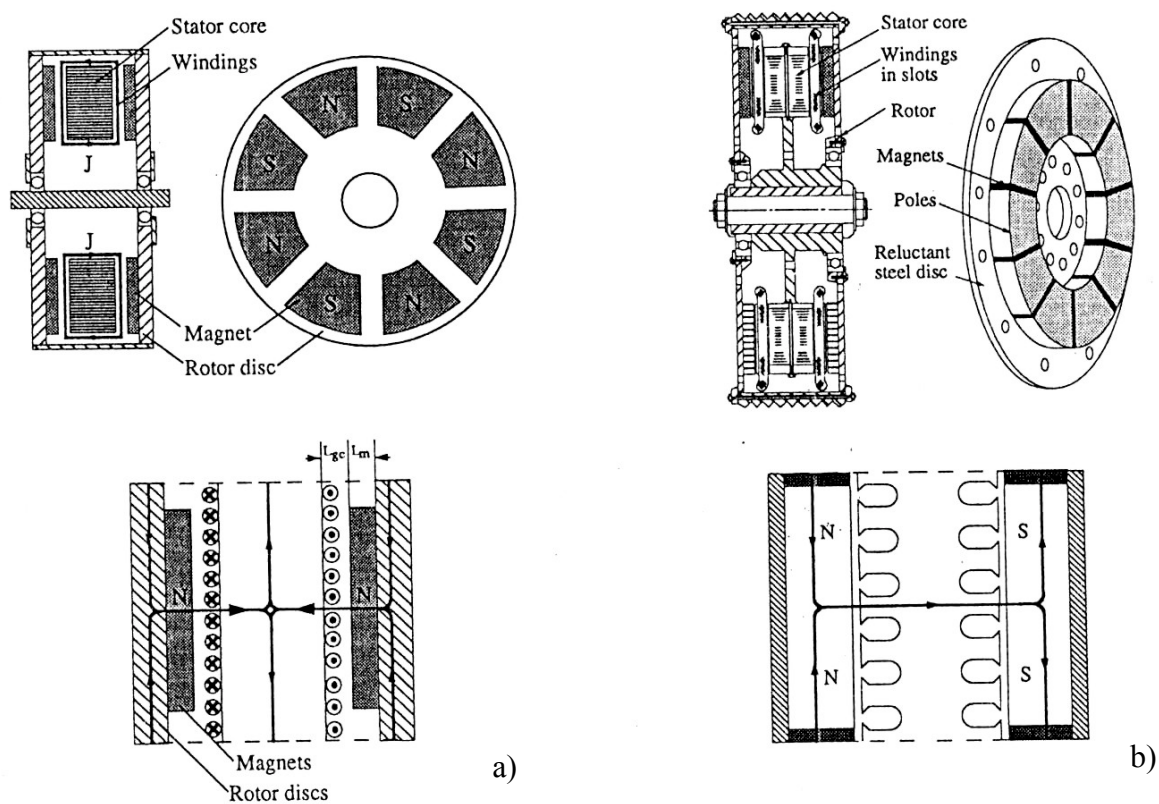
Sl. 57. *Halbach* raspored PM na rotoru i fotografije rotora i statora

Kao što je kod radijalnih motora u obliku diska i transverzalnih motora neophodno upotrebiti veliki broj polova tako je i u slučaju motora sa aksijalnim fluksom. Optimizacija je u slučaju motora za solarno EV *Aurora* rezultovalo dizajnom sa 40 polova koji je omogućio

značajno smanjenje gubitaka usled vrtložnih struja uz prihvatljivu učestanost invertora i širinu PM.

Nekoliko modela motora sa aksijalnim fluksom je prikazano u [71]. Radi se o motorima koji su namenjeni upotrebi u većim, putničkim EV. Samim tim je neophodno veću pažnju posvetiti njihovoj robusnosti. Prikazani su motori sa PM i asinhroni motori, mada se i drugi tipovi motora mogu konstruisati u ovom obliku.

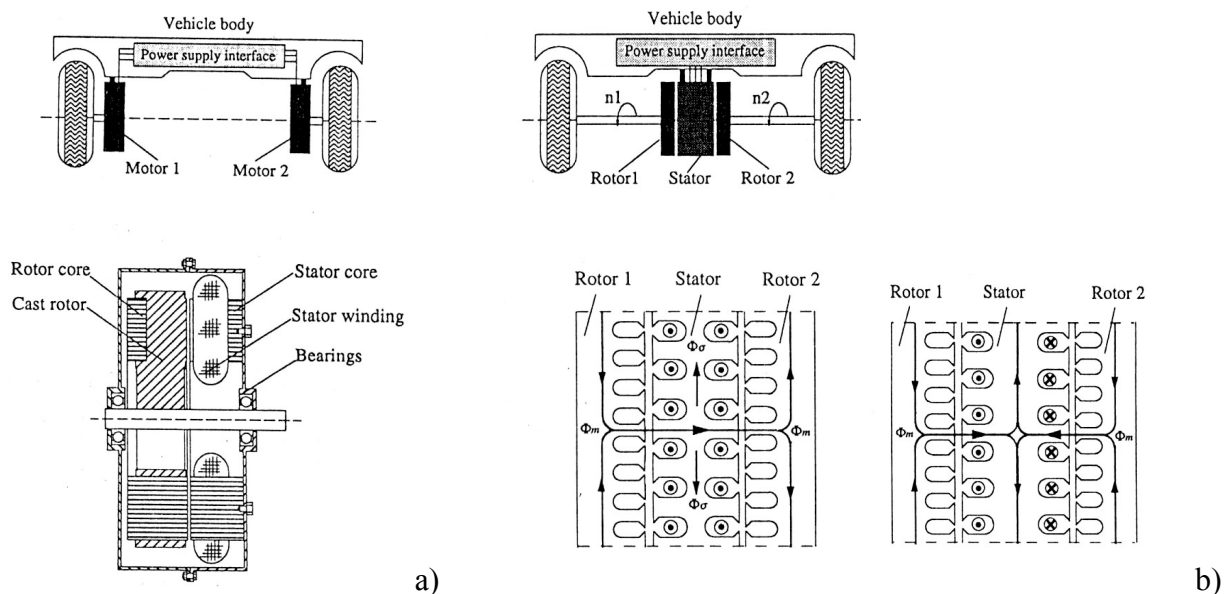
Od motora sa PM prikazani su motori sa Sl. 58. Prvi je *slotless* motor sa površinski montiranim PM. Njegove prednosti su jednostavna i jeftina konstrukcija magnetnog kola u obliku namotaja amorfnе feromagnetne trake, mala valovitost momenta i veća efikasnost jer nema zasićenja i gubitaka u zupcima. Nedostatak je velika osetljivost motora na mehaničke i elektromagnetne sile koje se javljaju u toku eksploatacije, kao i velik efektivan vazdušni zazor. Velika širina efektivnog zazora ima za posledicu da je veoma mala vrednost induktivnosti namotaja statora. Ovo ima za posledicu nemogućnost rada motora u oblasti slabljenja polja.



Sl. 58. a) *Slotless* motor sa površinski montiranim PM i aksijalnim fluksom,
b) Motor sa ugrađenim PM i aksijalnim fluksom

Drugi motor prikazan na Sl. 58. se odlikuje izuzetno robusnom strukturom, a ima i reluktantnu komponentu momenta. Taj motor je moguće eksploatisati i u oblasti slabljenja polja i to sa odnosom između maksimalne i bazne brzine koji je jednak 3. Prednost ovog motora nad prethodnim je i upotreba PM pravougaonog oblika.

Dve varijante asinhronog motora sa aksijalnim fluksom prikazane su na Sl. 59. Prvi motor je klasičan asinhroni motor sa aksijalnim fluksom. Odlikuje se istim karakteristikama kao i običan asinhroni motor, ali sa povećanom specifičnom snagom zahvaljujući upotrebi velikog broja polova. Treba primetiti da su i namotaj statora i kavez rotora postavljeni u radialnom pravcu.



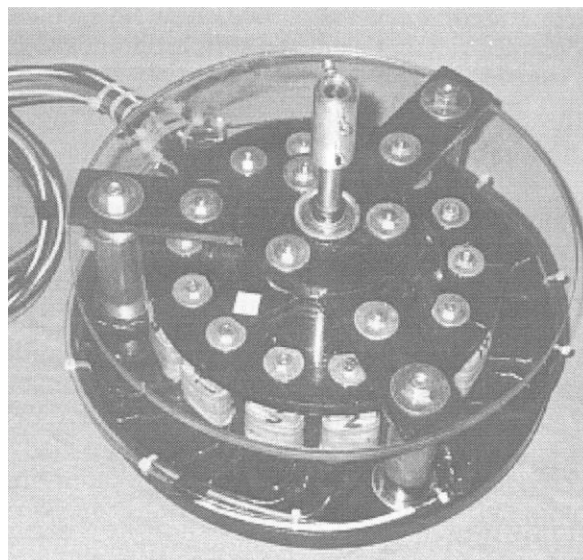
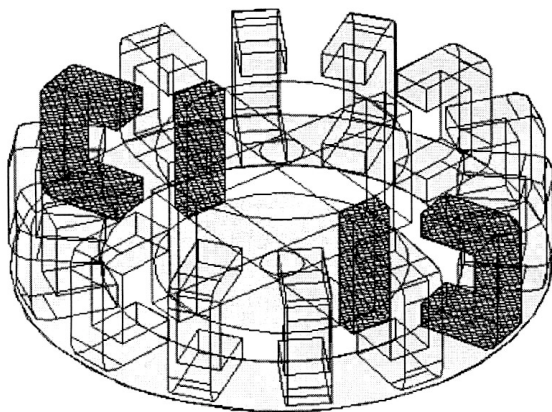
Sl. 59. a) Asinhroni motor sa aksijalnim fluksom,
b) Asinhroni motori sa dva rotora aksijalnim fluksom tipa NN i NS

Na Sl. 59. b) su prikazane dve varijante motora sa dva rotora koji se primenjuje umesto motora i diferencijala. Ovakvu mogućnost pruža samo upotreba asinhronog tipa motora. Svi sinhroni i brushless motori moraju da imaju jednake brzine oba rotora da bi se oni zadržali u sinhronizmu i da ne bi došlo do prestanka stvaranja momenta. Samim tim je, u slučaju da se primenjuju motori sa PM ili reluktantni motori nužno koristiti višemotorni dizajn. Ovo dovodi do uslozňavanja elektronskih kola na vozilu pošto svaki motor mora da ima svoj inverter i svaki inverter mora da ima svoje kontrolno kolo. Da bi se dobile odgovarajuće karakteristike motora neophodno je uvesti regulacionu strukturu koja bi zadavala brzine za pojedine motore. Ovo kolo bi bilo neka vrsta elektronskog diferencijala. Varijanta prikazana na Sl. 59. b) je krajnje jednostavna i podrazumeva postojanje samo jednog invertora i kontrolera.

U zavisnosti od načina namotavanja statora motori sa dva rotora se dele na NN i NS tipove motora. Kod prvih su obe strane statora jednako namagnetisane. Da bi se to postiglo neophodno je izvesti namotaj sa odgovarajućom glavom. U tom slučaju se koristi veća količina bakra, ali se štedi na magnetnom kolu jer se kroz jaram zatvara samo rasipni fluks. Kod NS motora se štedi na namotajima jer se namotavanje vrši oko statora. Međutim, u ovom motoru se javlja cirkularna komponenta fluksa, pa je neophodno napraviti magnetno kolo sa debljim jarmom.

Odlika svih tipova motora sa aksijalnim fluksom je da su konstruisani sa velikim brojem polova kako bi se ostvario veliki moment pri malim brzinama i da bi imali veliku specifičnu snagu i malu dužinu. Sa povećanjem broja polova se smanjuje potrebna debljina magnetnog jarma, a samim tim se smanjuje i dužina, odnosno debljina ovih motora. Druga bitna stvar koja utiče na kompaktnost dizajna ovih motora je to što su prečnici statora i rotora jednaki ili skoro jednaki. Aktivan deo motora je onaj koji se nalazi između unutrašnjeg i spoljašnjeg prečnika statora dok je kod mašina sa radialnim fluksom aktivan samo unutrašnji deo cilindra.

Za kraj će biti predstavljen motor koji je nazvan Motor u obliku diska sa promenljivom reluktansom, PM i aksijalnim fluksom (AFVRPMDM - Axial Flux Variable Reluctance Permanent Magnet Disc Motor). Crtež i fotografija ovog hibridnog motora prikazani su na Sl. 60. Stator ovog motora je izrađen od 14 polova oblikovanih kao slovo U i pričvršćenih na nemagnetni disk. Pošto se radi o sedmofaznom motoru, to znači da po svakoj fazi statora postoji po dva pola. Rotor se sastoji od 4 reluktantna pola na koje su pričvršćeni PM.



Sl. 60. Crtež i fotografija AFVRPMDM motora

Ovaj motor je opisan u /2/ gde je navedeno da njime može da se upravlja kao sa koračnim, BLDC ili sinhronim motorom. Karakteristike motora su kombinacija karakteristika svih tipova motora od kojih je ovaj hibrid preuzimao konstruktivne elemente. Kao aksijalni on se odlikuje smanjenim gubicima u gvožđu, zahvaljujući činjenici da nema komponente fluksa koja se zatvara radijalno, namotaji pojedinih faza su raspregnuti, a to omogućava veliku slobodu u izboru upravljačke strategije. U odnosu na klasičan reluktantni motor, ovaj hibrid ima veću specifičnu snagu i kompaktniji je zahvaljujući upotrebi PM. U /2/ je prikazan prototip ovakvog motora. Pravih testova u eksploatacionim uslovima još uvek nema, tako da se o robusnosti konstrukcije ne može suditi.

U svakom slučaju se radi o vrlo složenom motoru koji ima dobru efikasnost i veliku vrednost momenta pri malim brzinama kao i laganu i relativno jeftinu konstrukciju. Bez detaljnijih podataka o njegovim performansama ne može se suditi ni o budućnosti tog motora. U svakom slučaju ovaj motor odlično demonstrira trendove u istraživačkom radu na polju savremenih motora za EV.

5. GENERATORI ZA HEV

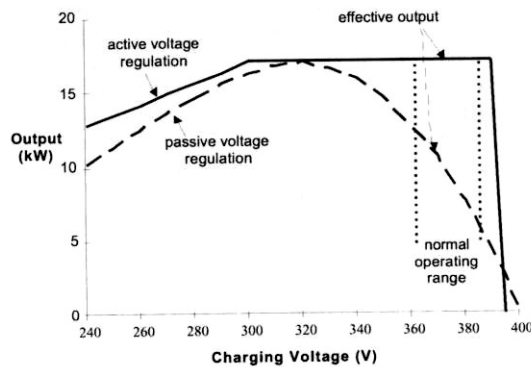
S obzirom da svi vučni motori rade i kao generatori u režimu rekuperativnog kočenja EV, jasno je da svi opisani tipovi električnih mašina mogu da se pojave i u ulozi generatora kod HEV. Zbog toga će u ovoj glavi samo ukratko biti predstavljeno nekoliko primera za generatore. Navedeni primeri su slučajno izabrani, bez namere da se predstavje kao reprezentativan uzorak. Predstavljani generatori se mogu svrstati u dve grupe: ultrabrzi i generatori sa rotorom u obliku diska. Osim ovih specifičnih mašina, kao generatori za HEV se mogu koristiti i, manje više, standardne mašine.

Prilikom izbora generatora za HEV, neophodno je odabrati mašinu koja će se lako uklopiti sa pogonskom toplotnom mašinom. Bitno je i to da se mašina lako uklapa u prostor koji joj je na raspolaganju, ali i da bude male mase i velikog stepena korisnog dejstva.

U /5/ je prikazan postupak izbora odgovarajućeg generatora za prikolicu za povećanje radijusa kretanja. To je prikolica kojom se čisto EV pretvara u serijski hibrid. Da bi pomenuta prikolica bila pogodna za vuču i da ne bi kao posledica upotrebe prikolice efikasnost čitavog vozila bila značajno smanjena (zbog povećanja otpora vuče) ustanovljeno je da ona ne sme da teži više od 150kg. Osim ograničenja po masi nužno je izabrati mašinu koja je kompaktna i lako

se hladi kako bi se ugradnja u zatvorenu prikolicu (zbog otpora vazduha) obavila što lakše. Potrebna snaga agregata iznosi 15 - 25kW.

U tom članku je pokazano da ni jedan komercijalno dostupan agregat ne zadovoljava date specifikacije. Sledeća važna karakteristika sistema za dopunjavanje baterija je rad sa konstantnom snagom sve do maksimalnog napona akumulatora. Potrebna karakteristika generatora prikazana je na Sl. 61. Ovo je moguće postići na dva načina: upotrebom predimenzionisanog generatora ili DC/DC konvertora, regulatora napona. U suprotnom će generator davati maksimalnu snagu samo u jednoj radnoj tački (isprekidana linija).



Sl. 61. Karakteristika sistema za punjenje akumulatora (generator i DC/DC konvertor)

Jedine mašine koje su mogle da se uklape u specifikacije stručnjaka iz *AC Propulsion Inc.* su alternatori za avione. Problem sa tim mašinama je u njihovoj velikoj ceni. Pošto prostor za smeštaj mašine nije striktno definisan u razmatranom slučaju (prikolica je razvijana kao sasvim nov sklop) i izabran je brzi motor SUS (sa 9600o/min) za pogonsku mašinu. Pošto je to za električne mašine još uvek prihvatljiva brzina, moglo se primeniti opisano rešenje.

Vučni asinhroni motor istog proizvođača je adaptiran da radi kao generator. Regulacija napona i faznog stava je postignuta jeftinim regulatorom koji se sastoji od baterija kondenzatora i prekidačkih elektronskih komponenti. Uključivanje i isključivanje komponenti se obavlja sa učestanošću indukovano signala (nekoliko stotina Hz) i to u trenucima kada je struja jednaka nuli. Na ovaj način je ostvareno jednostavno i jeftino rešenje. Sam generator je napravljen od istih elemenata kao i motor, ali je paket limova smanjene dužine.

Na ovaj način je ostvaren jeftin, jednostavan i kvalitetan sistem za dopunjavanje akumulatora EV. Upotrebljena je, manje više, standardna mašina u ulozi generatora. Efikasnost generatora je procenjena na oko 90%. Ekološki efekti primene ovakve prikolice su značajni, mada ne i najbolji koji se mogu ostvariti pri prelasku sa konvencionalnih vozila na HEV.

Da bi se postigli bolja efikasnost i manja količina izduvnih gasova potrebno je koristiti drugačije toplotne mašine kao što su gasne turbine. Međutim, gasne turbine zahtevaju upotrebu drugačijih generatora što je tema narednog odeljka.

Potrebno je naglasiti da se kao generatori najčešće sreću sinhronne mašine sa PM. One su pogodne zbog velike efikasnosti i specifične snage, a odgovaraju i po pitanju hlađenja jer nemaju gubitaka na rotoru, a odvođenje toplote sa statora je relativno jednostavno. Pomenuti primer upotrebe asinhronog generatora je, najverovatnije, izrazito redak slučaj. Osim generatora sa PM, u upotrebi se mogu pronaći i impulsi reluktantni generatori (SRM). Da je ova mašina podesna za rad u generatorskom režimu može se videti iz referenci /75, 76/.

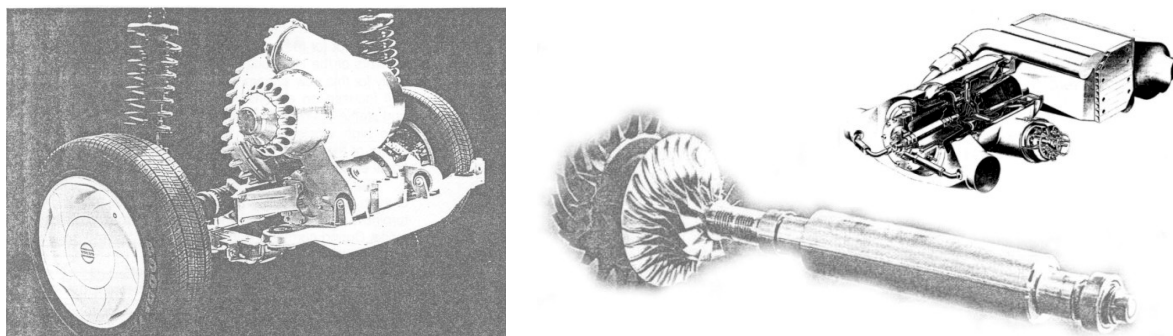
5.1 Ultrabrzi generatori

Gasne turbine su ekonomičnije od drugih tipova toplotnih mašina i manje zagađuju čovekovu okolinu ukoliko rade u nominalnom, optimalnom, radnom režimu. Pokušaji da se ove

mašine iskoriste za pogon automobila propali su zbog toga što se taj, optimalan, režim odlikuje izuzetno velikom brzinom rada. Nije bilo moguće proizvesti pouzdan i efikasan reduktor koji bi omogućio pokretanje automobila pomoću gasne turbine. Drugi problem sa gasnom turbinom je regulacija njene snage što je i danas nerešeno pitanje /77/.

Da bi se gasna turbina ipak upotrebila za pogon HEV u Švedskoj je još 1986. godine pokrenut istraživački projekat sa ciljem da se konstruiše ultrabrzi generator (HSG - High Speed Generation) /12/. Rezultat ovog projekta na kojem su učestvovalе firme poput VOLVO-a i ABB-a, je proizvodnja HSG sinhronog generatora sa PM koji je direktno spregnut sa rotorima kompresora i gasne turbine tako da se vrti sa neverovatnih $90,000\text{ o/min}$. Snaga ovog generatora namenjenog za ugradnju u putničko HEV iznosi 38W, a slična mašina koja se ugrađuje u hibridne kamione i autobuse ima sledeće karakteristike: brzinu u opsegu $50,000$ do $70,000\text{ o/min}$ i snagu koja se menja sa brzinom u opsegu od 30 do 110 kW /77/. Obodna brzina rotora druge mašine dostiže neverovatnih 230 m/s (828 km/h) /77/. Da se pri tim brzinama ne bi razleteo, rotor se proizvodi od cilindričnog PM koji se nalazi u metalnoj košuljici. Tehnološki postupak podrazumeva upotrebu visokog pritiska i obavlja se u specijalno izgrađenoj fabrici.

Na Sl. 62. su prikazane fotografije pogonskog sistema automobila VOLVO ECC, rotor generatora i turbine, kao i crtež takve jedinice namenjene za ugradnju u hibridne autobuse i kamione.



Sl. 62. Pogonski sistem Volvo-a ECC (gasna turbina, generator, asinhroni motor i prenosni mehanizam), rotor generatora i gasne turbine i crtež HSG agregata za upotrebu u kamionima i autobusima

Konstrukciju rotora generatora karakteriše rotor sa: maksimalnom zapreminom PM, sinusoidalnom raspodelom magnetnog fluksa u zazoru, minimalnim gubici na površini rotora, malom reaktansa i minimalnim rizikom od demagnetizacije. Stator je izrađen sa prstenastim namotajem i *slotless* strukturom. Ovaj namotaj je lakši za izradu od klasičnog cilindričnim namotajem. Osim toga, smanjene su glave namota, a time i gubici u bakru. Gubici se delimično nadoknađuju usled povećanja prečnika mašine, ali se javljaju u statoru gde je lako odvesti toplotu.

Sam namotaj se pravi od finožičnog (*Litz*) provodnika kako bi se smanjili gubici usled vrtložnih struja. Broj žila upotrebljenih za izradu namotaja iznosi 3,780. Namotaj je učvršćen, zaliven, lepilom na bazi epoksidnih smola sa dodatkom bor nitrata koji ima namenu da poboljša provođenje toplote i mehanički ojača namotaj.

Prečnik rotora je ograničen, kako je to već implicitno rečeno, maksimalnom brzinom, odnosno centrifugalnom silom koju može da podnese materijal od kog se on izrađuje. Drugi ograničavajući faktor se odnosi na dužinu rotora u odnosu na njegov prečnik. Osim toga mora se obratiti pažnja na kritične brzine generatora koje ne smeju da se nađu u blizini radne brzine generatora. Radna tačka generatora se nalazi između 3. i 4. kritične brzine. Rotor generatora u kompletu sa rotorima turbine i kompresora su oslonjeni na samo dva ležaja koji se nalaze sa svake strane rotora generatora, a kola turbine su samonoseća.

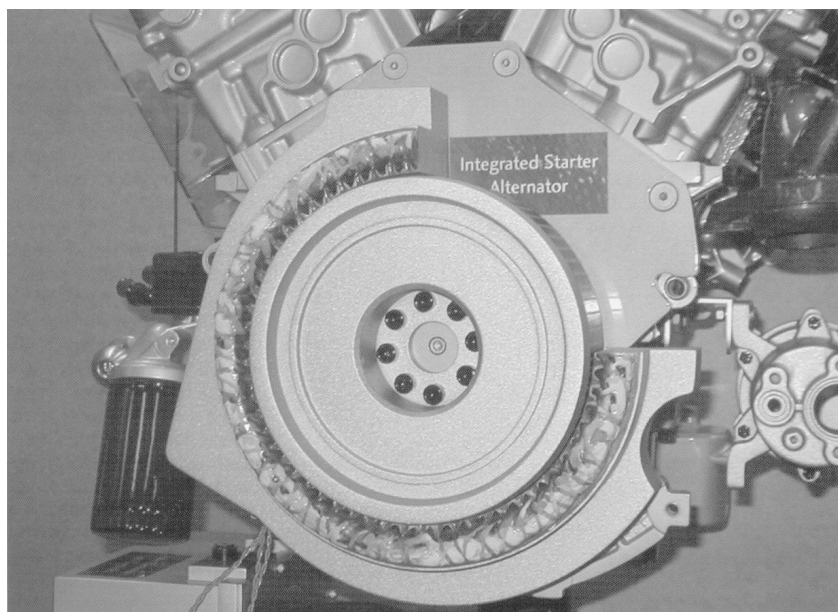
Efikasnost mašine mora da bude izuzetno visoka, ne samo da bi čitav auto imao dobru efikasnost već da ne bi došlo do pregrevanja generatora. Step en korisnog dejstva ovog generatora iznosi oko 96%. Učestanost indukovano g napona je za varijantu namenjenu autobusima i kamionima 1170Hz. Da bi gubici u statoru ostali na razumno niskoj vrednosti magnetno kolo statora je napravljeno od feromagnetnih limova koji su specijalno termički tretirani da im se smanje histerezisni gubici. Debljina limova iznosi 0.2mm.

Volvo i ABB su predvideli ugradnju veoma sofisticiranog upravljačkog sistema koji, regulišući napon DC međukola, održava stabilnost u električnom sistemu automobila. Da nema takvog sistema regulacije moglo bi se desiti da sistem postane nestabilan i da mašine počnu da osciluju. Osim održavanja stabilnosti sistema, takva regulacija je jedini način da se u izvesnoj meri upravlja snagom gasne turbine. Ovo je neophodno primenjivati kod autobusa i kamiona, dok je kod putničkog automobila potrebno rasterećivati generator u momentima kada automatski menjač stepena prenosa menja prenosni odnos. Rasterećenje sistema nastaje tako što regulator podigne napon DC međukola. Upravljanje gasnom turbinom preko napona DC međukola nije naročito precizno, ali to ne predstavlja veliki problem jer u čitavom sistemu postoje i akumulatori koji kompenzuju eventualne greške regulacije.

Na kraju je veoma važno istaknuti da pomenuti generator prilikom startovanja gasne turbine radi u motorskom režimu. Tada se pogoni iz odgovarajućeg invertora koji postepeno povećava učestanost dok se generator ne zaleti dovoljno da dalje može i sam da ubrzava. Ovaj režim rada generatora je kratkotrajan, ali može da se javlja relativno često, a u zavisnosti od uslova na putu i vozačevog stila vožnje.

5.2. Generatori sa rotorom u obliku diska

Kada se kao pogonski toplotni motor u EV koriste motori manjih brzina od gasne turbine, a naročito ako je reč o dizel motoru, mora se primeniti i generator drugačijih karakteristika. Kao što je bio slučaj sa motorima u točku vozila koji ima direktan prenos, pa samim tim i malu brzinu, i kod generatora male brzine treba odabrati konstrukciju koja se odlikuje velikim momentom pri maloj brzini. Za ovakvu primenu su podesne mašine sa rotorom u obliku diska i velikim brojem polova. Osim toga, kada se kao pogonska mašina koristi dizel ili benzinski sporohodni motor, kritičan je i prostor za smeštaj generatora. Ovi razlozi su doveli do razvoja generatora u obliku diska koji se ugrađuju između motora i prenosnog mehanizma zamenjujući na taj način i zamajac motora SUS. Jedan takav primer prikazan je na Sl. 63.

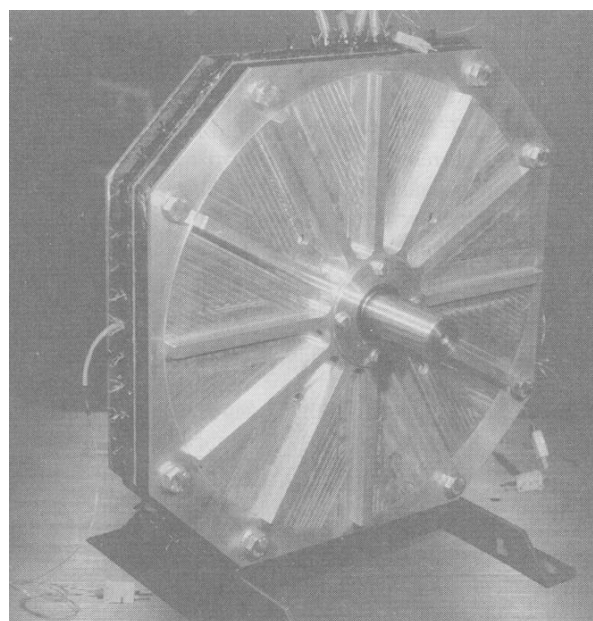
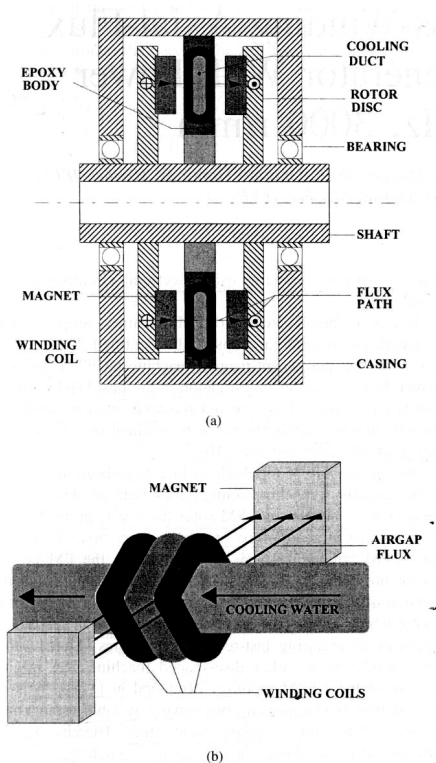


Sl. 63. Starter/generator sa rotorom u obliku diska, ugrađen između motora i prenosnog mehanizma

Primer takve mašine je i ona koja je upotrebljena u *GM Precept* vozilu, prikazanom na Sl. 27. Radi se o mašinama koje se često javljaju kod paralelnih hibrida, mada nije nužno da postoji to ograničenje. Čak se predviđa upotreba takvih starter/generatora i u klasičnim automobilima kod kojih je broj i snaga potrošača električne energije toliko porastao da se mora primeniti viši napon i alternator veće snage koji se onda koristi i kao elektropokretač.

Mašina prikazana na Sl. 63. je sinhroni generator sa PM. On se napaja iz invertora kada radi u motorskom režimu, a isti taj pretvarač se koristi i za regulaciju napona generatora kako bi se dobila karakteristika kao na Sl. 61. Sve karakteristike ovakve mašine su praktično navedene u tački 4.5.1 gde su opisani radijalni motori za ugradnju u točku. Jedina razlika između tih dvaju mašina je tu tome što je kod motora u točku primenjena konstrukcija sa spoljašnjim, a ovde sa unutrašnjim rotorom.

U /74/ je predložena varijanta takvog generatora sa aksijalnim fluksom. Njegova primena nije ograničena samo na HEV, već se pominju i brodovi i avioni kao moguća mesta primene. Radi se o mašini sa dvostrukim rotorom sa površinski montiranim magnetima i *slotless* i *coreless* namotajem. U suštini je mašina veoma slična onoj koja se koristi u solarnom vozilu *Aurora*, tačka 4.5.2. Razlika je u većoj snazi i dimenzijama kao i u mogućnosti da se kroz namotaj propušta voda za hlađenje. Namotaj je izveden u specijalnom, romboidnom obliku kako bi se minimizovale glave namota. Sl. 64. prikazuje presek mašine, skicu namota i fotografiju prototipa.



Sl. 64. Skica podužnog preseka mašine, dela namota mašine i fotografija prototipa

Vazdušni namot ima tu pogodnost za upotrebu u generatoru sa PM što je induktivnost statora izuzetno mala tako da reakcija indukta praktično ne postoji. U /74/ je saopšteno da je pad napona ovog generatora pod punim opterećenjem svega 6% u odnosu na napon u praznom hodu. Ovo je korisno svojstvo s obzirom da je teško regulisati napon generatora sa PM budući da nemaju pobudni namotaj. Osim ovoga, konstrukcija bez magnetnog jezgra se odlikuje i velikom efikasnošću pošto nema gubitaka u gvožđu. Uz upotrebu bakarnih traka debljine 1mm, umesto *Litz* žice, za izradu namotaja, dobija se konstrukcija sa efikasnošću od oko 92%. Kada bi se

upotrebile trake manje širine stepen korisnog dejstva bi se povećao na 94.3% usled smanjenja gubitaka na osnovu vrtložnih struja.

Još jedna prednost konstrukcije bez magnetnog kola je i to da su talasni oblici indukovane ems gotovo idealne sinusoide. Ovo je posledica linearnosti vazduha u magnetnom pogledu. Cena koja se plaće je relativno mala vrednost magnetne indukcije u zazoru koji je velik.

Ako bi se ovakav generator primenjivao u slučaju kada je njegov prečnik ograničen na malu vrednost pa rezultujući moment nije dovoljan, moguće je ugraditi dodatne module. Ako se dogradi j novih statora onda broj rotora iznosi $j+1$. Bitno je zapaziti da samo krajnji rotori moraju da imaju feromagnetni disk za nošenje PM, a ostali mogu da budu izrađeni od aluminijuma. Ovo je posledica činjenice da se samo kroz krajnje rotore radijalno zatvara fluks.

Za kraj treba još jednom pomenuti da se kao generator, odnosno starter/generator ili motor/generator vrlo uspešno može koristiti impulsna reluktantna mašina. U /75/ je opisana upravo takva primena SRM, ali u avionu. Na osnovu /76/ se može steći uvid o složenosti upravljačkog kola koje je neophodno da bi SRM radio kao generator pošto on nema svoju pobudu. Takva situacija se javljala i kod asinhronog motora. Moguće je izvući zaključak da upravo zbog složenosti prateće elektronike i algoritama upravljanja ove mašine nemaju preveliku popularnost kao generatori. Pošto je projektovanje HEV izuzetno složen postupak na koji utiče jako veliki broj faktora, moguće je da se u nekim slučajevima, zbog dobrih osobina koje SRM ima kao motor, on pojavi u ulozi motor/generatora.

6. IZBOR TIPA VUČNOG POGONA EV/HEV

U prethodnim poglavljima su opisane različite električne mašine koje se upotrebljavaju ili se predviđa da će se upotrebljavati za izradu vučnog pogona EV/HEV. Kroz tekst su pokazane i značajnije međusobne uslovljenosti pojedinih podsistema vozila. Prikaz ovih međuzavisnosti dat je u Tab. 2 koja je sačinjena po uzoru na tabelu iz /3/, odnosno /7/. Međusobne uslovljenosti pojedinih podsistema vozila posebno su značajne u procesu projektovanja EV/HEV.

Očigledno je da izbor vrste upotrebljenog vučnog motora uslovljava na određen način skoro sve ostale podsisteme vozila. Sa druge strane izbor vrste prenosa snage (transmisije) uslovljava upotrebu određenog tipa motora. Direktan prenos zahteva upotrebu sporohodnih motora sa širokim brzinskim opsegom, dok upotreba planetarnog reduktora velikog prenosnog odnosa omogućava upotrebu kompaktnih brzohodnih mašina. Ako bi se upotrebio prenos sa menjačem stepena prenosa to bi omogućilo upotrebu motora sa malim opsegom brzina. Slična analiza može da se sprovede za ma koji od parova podsistema vozila.

Ciljevi koje treba postići pri projektovanju EV/HEV su:

- Niska cena vozila,
- Odgovarajuće performanse (ubrzanje, maksimalna brzina, domet itd),
- Ekonomičnost u eksploataciji (visoka efikasnost),
- Robusnost, pouzdanost i bezbednost (jeftino održavanje).

Da bi se postigli ovi ciljevi neophodno je primeniti sistemski pristup u projektovanju. Najbolji način je da se od samog početka uvažava sve međuzavisnosti podsistema vozila. Kako je dizajn skoro svih komponenti vozila najznačajnije uslovljen izborom tipa vučnog pogona neophodno je ovom izboru posvetiti naročitu pažnju. Taj posao nije nimalo jednostavan zbog različitih svojstava pojedinih motora pa i pratećih elemenata vučnog podsistema kao i zbog njihove međusobne uslovljenosti. Razmatranje mogućih algoritama za izbor odgovarajućeg tipa pogona u ranim fazama projektovanja EV/HEV izlazi iz okvira ovog rada.

U ovom odeljku su međusobno poređeni različiti tipovi vučnih pogona, odnosno vučnih motora. Ovo treba da posluži kao ilustracija složenosti problema, ali i kao polazni osnov u analizi prihvatljivosti pojedinih rešenja.

Tab. 2 Međusobne uslovljenosti pojedinih podsistema pri projektovanju EV/HEV

	Motor	Pretvarač	Transmisija	Kontrolna el.	Točkovi	Karoserija	Šasija	Vešanje	Kočnice	Upravljač	Pomoćno nap.	Akumulatori	Punjač akumul.	Temperaturna zaštita	Upravljanje potrošnjom
Motor	↗														
Pretvarač	✓✓	↗													
Transmisija	✓✓	✓	↗												
Kontrolna el.	✓✓	✓✓	✓✓	↗											
Točkovi	✓✓	✓	✓✓	✓✓	↗										
Karoserija	✓				✓✓	↗									
Šasija	✓✓	✓✓	✓✓	✓	✓✓	✓✓	↗								
Vešanje	✓✓	✓	✓✓		✓✓	✓✓	✓✓	↗							
Kočnice	✓✓	✓	✓✓	✓✓	✓✓		✓	✓✓	↗						
Upravljač	✓✓	✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓	✓✓	✓✓	✓✓	↗					
Pomoćno nap.		✓		✓✓			✓		✓✓	✓✓	↗				
Akumulatori	✓✓	✓✓	✓	✓✓	✓	✓✓	✓✓		✓	✓	✓✓	↗			
Punjač akumul.	✓	✓		✓		✓	✓		✓		✓	✓✓	↗		
Temp. zaštita	✓✓	✓✓	✓	✓		✓	✓				✓✓	✓✓		↗	
Upr. potrošnjom	✓✓	✓✓	✓	✓✓	✓	✓			✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓	↗

✓ - predstavlja umerenu interakciju između dva podsistema

✓✓ - označava izraženu interakciju između dva podsistema

Izbor tipa generatora za HEV je krajnje pojednostavljen i objašnjen je u glavi 5. Zbog toga se u nastavku teksta razmatraju samo vučni motori.

6.1 Poređenje različitih tipova vučnih motora

Osnovni cilj ovog poređenja bio bi da se odgovori na pitanje koji je vučni motor pogodniji za primenu u EV. Međutim, na to pitanje se ne može jednoznačno odgovoriti jer i među EV postoji širok spektar primena i specifikacija. Neki motori su pogodniji za primenu u jednoj vrsti vozila dok su drugi pogodni u drugoj vrsti. Ovo otežava jasnu i nedvosmisleni komparaciju.

Drugi problem koji se javlja pri pokušaju da se međusobno uporede vučni motori je problem izbora pravih kriterijuma za poređenje. U nekom slučaju to je cena, u drugom efikasnost, trećem dimenzije itd. Neki autori porede motore istih izlaznih parametara, dok drugi porede motore koji obezbeđuju iste performanse odabranom vozilu.

U dostupnoj literaturi je nemoguće pronaći poređenje svih tipova vučnih motora koji su obrađeni u ovom radu. Uglavnom se autori ograničavaju na tri vrste motora: asinhroni, PM motore i SRM. Često se kao referenca koriste motori jednosmerne struje za koje se sa sigurnošću može tvrditi da pripadaju prošlosti.

Na osnovu podataka koji se mogu pronaći u /4/, /14/, /31/, /66/, /72/ i /78/ ovde će biti izvršeno poređenje asinhronog, PM i SRM motora po određenim kriterijumima. Prikazani

rezultati se moraju uzeti sa odgovarajućom dozom rezerve pošto su prikupljeni iz različitih izvora i ne sadrže detaljnije podatke o karakteristikama pojedinih tipova motora.

Cena

Pravilan kriterijum kod poređenja cena bi bio da se porede cene čitavih pogona, a ne samo motora jer skuplji motori često imaju jeftiniji konvertor. Cena upravljačkog kola je sa jedne strane slična za sve tipove pogona, a sa druge predstavlja relativno mali iznos tako da nju nije potrebno uzeti u obzir. Radi ilustracije će u Tab. 3 biti prikazani relativni odnosi specifičnih cena samih motora, konvertora i čitavih pogona. Za razliku od nekih drugih prikaza u ovom slučaju će se kao referenca koristiti asinhroni motor.

Tab. 3 Poređenje različitih motora i pogona po njihovoj specifičnoj ceni

Tip motora	Asinhroni	PM motor	SRM ^❶
Cena motora [r.j./kW]	1	1.3 - 2.6	0.8 - 1.1 ^❷
Cena invertora [r.j./kW]	1	0.5 - 0.63	1 - 1.2 ^❸
Cena pogona [r.j./kW]	1	0.85 (1.03) ^❹	1.07 (1.05) ^❹

- ❶ Podaci o ceni SRM su krajnje nepouzdati pošto proizvodnja ovog tipa motora još uvek nije dostigla velike serije. Može se očekivati da njihove cene značajno padnu.
- ❷ Ova procena je dobijena posredno, preko cene PM motora. U ovom trenutku nije realno pretpostaviti da je cena SRM niža od cene asinhronog motora, ali se ova procena može pokazati kao tačna u budućnosti.
- ❸ Radi se o slobodnoj proceni koja se oslanja na odnos prividnih snaga konvertora i činjenicu da valovitost momenta SRM može da uslovi potrebu za motorom sa većim brojem faza.
- ❹ Podatak za PM motor je dat prema /66/, a za SRM izračunat na osnovu podataka za PM. Treba ga uzeti sa rezervom jer je podložan promenama budući da cene komponenti energetske elektronike naglo padaju pa se samim tim menja odnos cene motora prema ceni pretvarača /23/. Pošto je odnos cene motora prema ceni pretvarača u pogonu procenjen na 1:3.5 ovim podacima su favorizovani PM motori. U zagradi su dati podaci izračunati na osnovu odnosa cena 1:2 što je pretpostavka iz /23/.

Na osnovu podataka iz Tab. 3 može se zaključiti da se cene pogona značajno približavaju i da taj argument više nije presudan u izboru odgovarajuće tehnologije. U budućnosti se očekuje snižavanje cena PM i dalje smanjenje cena konvertora što će neminovno dovesti do promene ove situacije.

Efikasnost

Stepen korisnog dejstva konvertora za sve tipove motora se kreće u sličnim granicama, mada male razlike postoje. Zbog toga je u Tab. 4 prikazana samo efikasnost motora. Podatke ponovo treba prihvatiti sa rezervom jer nisu dati za iste uslove rada niti je definisano o kakvim modelima mašina se radi. Na primer, asinhroni motor koji ima povećanu maksimalnu brzinu ima nešto lošiji stepen korisnog dejstva od standardnog motora.

Efikasnost može da bude presudan faktor pri izboru motora za EV pošto su implikacije veoma značajne. Efikasniji pogoni se mogu napajati iz manjih akumulatora, a da se ne smanji njihov domet. Ovo ima za posledicu dalje povećanje efikasnosti čitavog vozila usled smanjenja njegove mase.

Generalno su najefikasniji PM motori, ali se ta efikasnost značajno narušava pri radu u režimu slabljenja polja. Najlošija je efikasnost SRM pri malim brzinama, ali vučni motor vrlo malo vremena radi u tom režimu.

Tab. 4 Poređenje motora po stepenu korisnog dejstva

Tip motora	Asinhroni	PM motor	SRM ^o
η pri 100% opterećenju [%]	84 - 95 ^o	90 - 97	85 - 96
η pri 10% opterećenju [%]	82 - 94 ^o		
η pri malim brzinama [%]			65 - 80
η u režimu slabljenja polja [%]	80 - 90	73 - 82	

- Različiti SRM mogu imati sasvim različite karakteristike u zavisnosti od radnog režima za koji su projektovani. U ovoj tabeli je procenjena efikasnost za motore optimizovane za režime slabljenja polja.
- Više vrednosti navedene za efikasnost asinhronog motora su malo verovatne za primenu u EV pošto se ne radi o motorima izuzetno velikih snaga, a ni o rešenjima koja se odlikuju najvećom mogućom efikasnošću s obzirom da su veliki opseg brzina pri slabljenju polja i efikasnost suprotni zahtevi. Ipak, mogućnost konstruisanja toliko efikasnih asinhronih motora postoji.

Masa i dimenzije

Među najznačajnijim problemima pri konstrukciji EV su pitanja mase i prostora. Akumulatori zahtevaju velik prostor za smeštaj, a velika im je i masa. Zbog toga se teži minimizaciji mase i dimenzija svih ostalih komponenti vozila, pa i motora.

Na sadašnjem stepenu razvoja energetske elektronike, dimenzije konvertora nisu preterano velike. Razlike u dimenzijama i masi konvertora za različite tipove motora su minimalne, ako uopšte postoje. To je razlog što se uglavnom porede dimenzije motora.

Mnogi autori smatraju da su specifični momenat i snaga zajedno sa zapreminskim momentom najznačajniji kriterijumi za izbor vučnog motora. Specifičan momenat za PM motor je najveći i kreće se u granicama od 3.61 Nm/kg /72/ do 6.4 Nm/kg /78/. Za asinhroni motor ta je vrednost najmanja i iznosi 0.8 Nm/kg /72/, dok je za SRM ona 3.7 Nm/kg /78/.

Podaci iz /66/ pokazuju da je masa asinhronog motora za 50% veća od mase PM motora koji automobilu srednje klase obezbeđuju iste performanse. Ovo je znatno povoljniji podatak od onih navedenih u /78/.

Na osnovu podataka o momentu motora po jedinici zapremine koji je dat u /72/ zaključuje se da su PM motori značajno kompaktniji od asinhronih. Odnos zapremine asinhronog motora prema PM motoru je 6.75. Potrebno je napomenuti da se u tom slučaju upoređuju motori malih snaga, namenjeni pokretanju solarnih vozila tako da taj odnos verovatno nije merodavan za motore putničkih automobila.

Robusnost, pouzdanost i održavanje

Pitanja robusnosti, pouzdanosti i održavanja su svakako veoma bitna za izbor odgovarajućeg motora. U sledećoj glavi će ukratko biti predstavljena iskustva iz eksploatacije pojedinih EV. Ovde je potrebno samo naglasiti da između asinhronog, PM i SRM motora ne postoje značajne razlike po pitanju održavanja. Ipak, SRM i asinhroni motor su robusnije konstrukcije pošto nema opasnosti od pojave značajnih kvarova kao što je demagnetizacija PM kod motora sa PM. Mali nedostatak ova dva motora, a prednost za motor sa PM predstavlja vazdušni zazor koji je mali kod prva dva motora što može da dovede do problema iz tačke 3.1.5.

Izlazni parametri

Mehanički parametri pojedinih motora predstavljaju izuzetno važan faktor pri projektovanju EV. Na osnovu njih se projektuju elementi prenosnika snage, upravljački algoritmi, dimenzionišu baterije i sl. U Tab. 5 su navedeni najznačajniji parametri razmatrana tri tipa mašina.

Tab. 5 Najznačajniji izlazni parametri asinhronog, PM i SRM motora

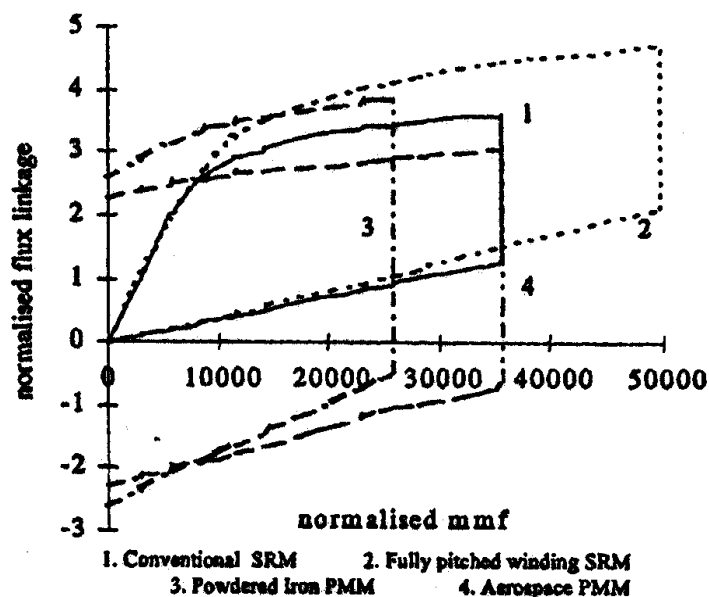
Tip motora	Asinhroni	PM motor	SRM
Maksimalna brzina [min^{-1}]	15,000	10,000	20,000
Opseg brzina pri oslabljenom polju	do 1:5	do 1:2.5	1:3 do 1:7
Mogućnost preopterećenja	do 1:3.2	oko 2	Najveća
Valovitost momenta [%]	< 7%	~ 10%	> 20%
Faktor snage, $\cos\phi$	0.8 - 0.9	do 1	0.6

Ekvivalentni motori

Već je napomenuto da postoje različiti načini za poređenje tipova motora. U svakom slučaju je potrebno porediti motore koji se po nekom kriterijumu mogu smatrati ekvivalentnim. Ovde će ilustracije radi biti prikazana dva različita pristupa.

U [78] se porede SRM i PM motor tako što se pretpostavljaju dva ista polazna parametra. To su maksimalna brzina od $10,000 \text{ min}^{-1}$ i širina oblasti konstantne snage od 3:1. Prvi zahtev je opravdan prevelikom cenom reduktora koji bi bio potreban za brzohodnije motore, a drugi zahtevanim ubrzanjem vozila. Ovim je omogućeno neposredno poređenje mašina istih momenata, ali se nepotrebno ograničava opseg slabljenja polja što je nepovoljno po SRM.

Da bi se posmatrale konstrukcione karakteristike mašina momenti se ne porede neposredno već se posmatra površina krive fluksnog obuhvata u funkciji magnetopobudne sile. Površina obuhvaćena krivom predstavlja promenu energije u jednom električnom ciklusu, što je srazmerno momentu. Sl. 65 prikazuje izgled jednog takvog grafika.



Sl. 65 Promena fluksnog obuhvata u f-j mms tokom jednog električnog ciklusa

U /4/ su međusobno poređeni motori koji obezbeđuju jednake performanse određenom modelu automobila. Ovo dovodi do toga da se međusobno porede motori različitih snaga, brzina i ostalih karakteristika. Ono što je potrebno uporediti su efikasnost i cena pogona ili čak čitavog automobila. U Tab. 6 su prikazani osnovni podaci različitih motora.

Tab. 6 Najznačajniji izlazni parametri asinhronog, PM i SRM motora

Tip motora	Asinhroni	PM motor	SRM
Bazna i maksimalna brzina [min^{-1}]	1,750/8,750	4,000/9,000	4,000/20,000
Opseg brzina pri oslabljenom polju	1:5	1:2.25	1:3 dalje prir. režim
Snage motora i konv.[kW/kVA]	65/79	86/92	68/113
Prenosni odnos reduktora	5.7:1	5.9:1	13:1

7. EKSPLOATACIJA, ODRŽAVANJE I POUZDANOST EV/HEV

Vučni motori i generatori EV/HEV u toku eksploatacije rade u ekstremnim uslovima. Ovaj problem je već istaknut u 3.1.5 sa ciljem da se pokaže kako o tome mora da se vodi računa pri projektovanju motora i generatora. U smislu eksploatacije i pouzdanosti ekstremni uslovi mogu da dovedu do niza problema koji su opisani u /37/ kao i do skraćenja životnog veka vozila, odnosno vučnog pogona.

Naročiti problemi mogu da se očekuju usled ekstremnih temperatura pri kojima se vozilo koristi, kao i od prodora stranih tela i vlage u unutrašnjost motora. Svakako treba pomenuti mogućnost pregrevanja mašine u slučaju eksploatacije na velikim nadmorskim visinama zbog slabijeg hlađenja, štetno dejstvo soli i drugih hemikalija, vibracija i sl. Za HEV je značajno pomenuti i zaštitu od požara kojoj treba posvetiti posebnu pažnju zbog postojanja toplotnog motora i goriva. Zbog svega ovoga je teško govoriti o opštim pokazateljima pouzdanosti EV/HEV jer se uslovi eksploatacije mogu značajno razlikovati.

Razlike u načinu održavanja i eksploatacije naročito postoje između EV i vozila sa motorom SUS. Hibridna vozila imaju u svom sastavu i toplotni motor pa na prvi pogled može da izgleda teže održavati takvo vozilo od klasičnog.

Električni motori se uglavnom izrađuju sa kugličnim ležajevima koji ne zahtevaju sistem za podmazivanje. To je jedan podsistem manje u odnosu na klasične automobile. Ovo je naročito značajno jer se radi o podsistemu koji zahteva neprestanu pažnju pri održavanju.

Dosta je čest slučaj i vrlo je verovatno da će postati pravilo da se električni vučni motori hlade vodom. Ovo znači da se pri eksploataciji i održavanju mora voditi računa o tom podsistemu kao i kod klasičnih vozila. Pumpa sistema za hlađenje kao i ostali pomoćni uređaji u EV se pokreće elektromotorima. To znači da je ukupan broj električnih motora veoma velik. Oni, međutim, ne zahtevaju neko naročito održavanje, za razliku od kaišastih prenosnika snage (remena) koje se primenjuje kod klasičnih automobila.

Periodično održavanje EV se svodi na proveru tačnosti u sistemu za hlađenje i zaptivenosti tog sistema. Osim ovoga, kod EV čiji se pogon napaja iz klasičnih olovničkih akumulatora neophodno je voditi računa o nivou elektrolita u ćelijama i stanju kontakata. Samo praćenje električnog stanja ćelija se obavlja uz pomoć računara i ne predstavlja naročito opterećenje. Održavanje akumulatora je zanemarljivog obima kod vozila sa motorom SUS.

Održavanje i eksploatacija HEV podrazumevaju obavljanje svih radnji koje su potrebne pri održavanju toplotnog motora (zamene ulja, remenja, svećica, filtera...), ali i održavanje akumulatora. Kada se ne bi posmatrale i ostale komponente vozila, HEV bi sa aspekta održavanja i eksploatacije bila vrlo nepovoljna. Međutim, HEV, a pogotovu EV, zahvaljujući mogućnosti rekuperativnog kočenja značajno smanjuju opterećenje kočnica tako da se troškovi i aktivnosti u vezi sa njihovim održavanjem drastično smanjuju.

U /36/ je navedeno da je na testiranom EV posle pređenih 85,000 km istrošenost kočionih obloga iznosila svega 30%. Ovo znači da bi originalne obloge mogle da traju i preko 280,000 km što se izjednačava sa životnim vekom vozila. U /81/ se pominje da slične uštede na održavanju hibridnih autobusa ostvaruje i *Metropolitan Transit Authorities* iz New York-a. Osim ovoga pominje se i ušteda koja se ostvaruju na osnovu toga što ne postoji mehanički prenosnik koji je podložan kvarenju i koji je neophodno održavati.

Uzimajući u obzir i to da su same električne mašine koje se koriste za EV/HEV izuzetno jednostavne i da se na njima troše jedino ležajevi, ukupan utisak je da su ova vozila neuporedivo povoljnija za održavanje od klasičnih.

Kada je reč o eksploataciji postoji još jedna razlika između vozila sa SUS motorom i EV. Naime, korisnici EV moraju svoje automobile da priključe na odgovarajući priključak za dopunjavanje akumulatora svaki put kada završe vožnju. Međutim, kako se izrazio jedan od autora iz /82/, to se svodi na razmotavanje i smotavanje nekoliko metara provodnika.

Sama vožnja se ne bi smela razlikovati od vožnje klasičnih vozila sa automatskim menjačem. Jedini dodatak bi mogao da bude potencijometar za podešavanje intenziteta regenerativnog kočenja /36/, slično kao kod autobusa i kamiona sa ugrađenim retarderima.

Među ostalim kvalitetima koje pruža upotreba EV/HEV vredelo bi istaći tihi vožnju i velike uštede u energiji/gorivu koje se ostvaruju njihovom primenom. Ekološki efekti su takođe značajni, mada se javljaju i oprečna mišljenja /83/. Sudeći po reakcijama u /82/ ova mišljenja su ipak usamljena.

U pogledu izdržljivosti mogu da se pronađu uglavnom ili isključivo pozitivni izveštaji. Na primer, u /79/ se nalazi izveštaj o trogodišnjoj eksploataciji adaptiranog Moskviča. U tom periodu vozilo je prešlo 21,000 km i ni jedna komponenta nije otkazala. Jedine komponente koje su promenjene i to posle svega 3 meseca eksploatacije su akumulatori. Ovo je razumljivo jer u samom početku nisu ugrađeni adekvatni, vučni akumulatori već su korišćeni starter akumulatori koji su neprikladni za ovu namenu.

Ovakva pouzdanost pogona je pomalo iznenađujuća s obzirom da se radi o zastarelom tipu pogona koji se sastoji iz rednog motora jednosmerne struje i tiristorskog čopera. Motori jednosmerne struje su inače vrlo nezgodni za održavanje, ali i za popravku. Uzrok je postojanje kolektora i četkica koji se neminovno troše tokom eksploatacije.

Gotovo identičan izveštaj o pouzdanosti, ali i ekonomičnosti i drugim relevantnim stvarima se može pronaći u /36/. Naravno, reč je o savremenijoj i kompletnijoj adaptaciji koja zapravo imitira EV projektovano od početka za tu namenu. Posle pređenih 85,000 km nije zabeležen ni jedan kvar osim otkaza akumulatora od kojih je dobar deo otkazao posle samo 6,500 km. To je ukazalo na neophodnost ozbiljnijeg prilagođenja akumulatora ovoj primeni. Radi se o spiralno motanim olovnim akumulatorima koji ne zahtevaju održavanje. Poslednja grupa akumulatora zamenjena je posle 65,000 km što je izuzetno povoljan rezultat.

Posebno ohrabruje podatak iz izveštaja koji govori o tome koliko su teški zahtevi postavljani pred vozilo u nekim trenucima. Govori se čak i o vozačima koji su pokušavali da izazovu bilo kakav kvar nepažljivim rukovanjem, ali im to nije pošlo za rukom.

8. ZAKLJUČAK

Sam obim ovog rada pokazuje koliko je kompleksna oblast EV/HEV. Radi se o interdisciplinarnom tehničkom problemu koji je izuzetno teško sveobuhvatno predstaviti. Ovaj rad se bavi samo jednim aspektom tog problema.

Kada bi se proširivao ovaj rad prvo bi trebalo obuhvatiti i detaljnije obraditi konvertore kojima se napajaju motori EV/HEV i akumulatori HEV. Zatim se treba detaljnije pozabaviti pitanjima upravljanja i to ne samo na nivou vučnih pogona, već čitavog vozila. Poseban problem predstavlja upravljanje opterećenjem.

Jedan primer slikovito govori o tome. Naime, ako se EV/HEV nalazi na padini i akumulatori su prazni ili poluprazni, postoji mogućnost rekuperativnog kočenja. Šta biva ako se vozilo nalazi na vrhu brda, a akumulatori su puni? Ovakvo iskustvo može biti veoma neprijatno. Situacija je još gora kada se radi o HEV pošto se toplotni motor i dopunjavanje moraju koristiti na optimalan način. Lako je moguće zamisliti situaciju kada se toplotni motor, pošto se akumulator napunio do maksimuma isključuje, a neposredno po tome se javlja potreba za kočenjem, i zašto da ne, zaustavljanjem. U takvom slučaju dolazi do potpunog i nepotrebnog gubitka energije i habanja kočionih obloga.

Dodatnu složenost predstavlja to što svaki vozač ima svoj stil vožnje, a od njega zavisi potrošnja energije. Da bi se na optimalan način razrešile ovakve stvari neophodno je koristiti sofisticirane načine upravljanja kao što su fuzzy logika /84/ ili veštačka ineligenција.

Osim ovoga može se javiti potreba za takvim upravljanjem vučnim pogonom kod paralelnih HEV koje bi omogućilo laganu promenu stepena prenosa (bez trzaja i opterećivanja mehaničkih delova) kod vozila sa mehaničkim menjačem stepena prenosa /85/. Pretpostavlja se da se radi o automatskom tačnije robotizovanom menjaču, mada to nije obavezno. Cilj upravljanja je da se u vreme promene stepena prenosa moment motora smanji na nulu.

Na Sl. 66 je prikazan paralelni hibrid, *Honda Insight* i njegova unutrašnjost. Jedna od zanimljivosti ovog modela je da se prenos snage na točkove obavlja preko manualnog menjača stepena prenosa čija se ručica vidi na fotografiji unutrašnjosti.



Sl. 66 Honda Insight i njena unutrašnjost

U vezi sa upravljanjem valja pomenuti i one mogućnosti koje stoje na raspolaganju projektantima EV, a nisu tako lako ostvarive kod klasičnih vozila. Takav primer može da se nađe u /80/ gde se saopštavaju prednosti električnog motora u kontroli proklizavanja točkova. Kod klasičnih automobila taj uređaj funkcioniše tako što aktivira kočnicu na točku koji počinje da proklizava. Ovaj način je sporiji od kontrole proklizavanja elektronikom koja upravlja električnim motorom. Osim toga, upotreba kočnice je povezana sa habanjem kočionih obloga i drugim sličnim pitanjima.

Prednosti servo pogona sa nezavisnim upravljanjem svakim točkom već su pomenute. Na taj način je moguće napraviti vozila sa najboljim mogućim performansama. Slično se kao cilj pred konstruktore električnih lokomotiva postavlja zahtev da se maksimizuje koeficijent adhezije upotrebom kontrolisanog proklizavanja točkova po šini /86/.

EV/HEV nikad nisu bila ozbiljnije shvaćena nego danas. U javnosti i stručnim krugovima se diskutuju sva moguća tehnička, socijalna, ekonomska i ekološka pitanja vezana za njihov razvoj. Nalazimo se u vremenu kada počinje sve intenzivnija upotreba ovih vozila. Jedno od tehničkih pitanja je i uticaj ovih vozila na elektroenergetski sistem. Mada mnogi smatraju da će masovna upotreba EV dovesti do velikih problema u obezbeđenju potrebne snage za punjenje njihovih akumulatora, postoji i suprotno mišljenje gde se ova vozila vide kao mogući lokalni izvori električne energije /87/. Cilj ovih izvora je "peglanje" vršne potrošnje domaćinstva na račun energije pohranjene u akumulatorima. Svi potrebni elementi za to postoje u EV. Potrebno je samo ugraditi priključke koji bi sa distribucijom bili povezani preko brojila koja beleže i količinu energije isporučenu mreži.

Poseban značaj u tom smislu bi imala HEV koja zaista mogu da proizvode električnu energiju na račun primarnog goriva. U članku se ističe da bi ovakvi generatori minimalno zagađivali atmosferu s obzirom na razvijenu tehnologiju prečišćavanja izduvnih gasova i rad toplotnih motora u optimalnom režimu. Tehnologija gorivnih ćelija bi bila još povoljnija u tom smislu.

Svi ovi, a i mnogi drugi faktori utiču na brzinu prihvatanja i razvoja EV/HEV. Samim tim je uslovljen i dalji razvoj električnih mašina koje svoju primenu nalaze u tim vozilima. Kontinuirani razvoj je neminovan pošto se stalno pooštavaju zahtevi koje mašine moraju da zadovolje.

U razvijenom svetu se ulaže u različita istraživanja iz ove oblasti. Na osnovu izveštaja državnih institucija kao što je /16/ može se steći uvid u to kolika se sredstva angažuju i kakve mašine možemo očekivati u budućnosti.

Prvi primer je SRM koji treba da radi na izuzetno visokim temperaturama. Namotaj ovog motora treba da izdrži temperature do 650° C. Na ovaj način bi se značajno povećala specifična snaga motora. Samim tim se smanjuju njegove dimenzije, utrošak materijala za izradu, a time se snižava i njegova cena.

Drugi projekat predviđa poboljšanje hlađenja rotora PM motora. Iako se rotor PM motora slabo zagreva, za ekstremno povećanje specifične snage motora neophodno je efikasno odvoditi toplotu sa njega zbog PM koji su osetljivi na pregrevanje (dolazi do njihove demagnetizacije). Pošto je nemoguće eliminisati zagrevanje neophodno je ili predimenzionisati ili intenzivno hladiti PM. U ovom projektu se predviđa razrada drugog principa.

Treći projekat takođe ima za cilj da poveća specifičnu snagu motora. Međutim, pristup tom problemu je sistemski. Predviđa se sistemski pristup u projektovanju motora i konvertora koji bi kroz optimizaciju elektromagnetnog kola, termičkog polja, strukturnih i upravljačkih parametara doveo do minimizacije dimenzija motora i konvertora uz efikasnu kontrolu temperature.

Ova tri projekta su samo primeri koji treba da pokažu u kojem smeru se razmišlja u vezi sa razvojem mašina za EV/HEV. Očigledno je da se radi o izuzetno živoj oblasti koja pruža velike mogućnosti daljeg razvoja. S obzirom na složenost i obim problematike jedini ispravan pristup ma kom projektu iz oblasti je sistemski. Nemoguće je projektovati kvalitetan vučni motor za EV/HEV ukoliko se ne definiše u kakvom okruženju će on raditi i kakve zahteve to okruženje postavlja pred njega. Kako je pokazano u glavi 6, definisanje projektnog zadatka i izbor tipa vučnog pogona prve su faze u projektovanju EV/HEV. Presudan uticaj na njih ima poznavanje svih mogućih rešenja i njihova analiza u odnosu na definisane sistemske zahteve.

9. LITERATURA

- /1/ Schallenberg R. H.: **Prospects for the Electric Vehicle: a Historical Perspective**, *IEEE Transactions on Education*, Vol. E-23, No. 3, 1980.
- /2/ Nelson A. L., Chow Mo-Y.: **Electric Vehicles and Axial Flux Permanent Magnet Motor Propulsion System**, *IEEE Newsletter*, vol. 46, no.4, December 1999, pp.3-6.
- /3/ Chan C. C., Chau K. T.: **An Overview of Power Electronics in Electric Vehicles**, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 44, No. 1, 1997.
- /4/ Ehsani M., Rahman K. M., Toliyat H. A.: **Propulsion System Design of Electric and Hybrid Vehicles**, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 44, No. 1, 1997.
- /5/ Gage T. B., Bogdanoff M. A.: **Low-Emission Range Extender for Electric Vehicles**, *AC Propulsion Inc. Web Site*, www.acpropulsion.com
- /6/ Chan C. C.: **Guest Editorial – Special Section on Electric Vehicle Technology**, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 44, No. 1, 1997.
- /7/ Chan C. C.: **Overview of Electric Vehicles – Clean and Energy Efficient Urban Transportation**, *Proceedings of the PEMC Conference*, Budapest 1996.
- /8/ Toepfer C. B.: **Charge! EVs power up for the long haul**, *IEEE Spectrum*, Vol. 35, No. 11, 1998.
- /9/ Hermance D., Sasagi S.: **Hybrid electric vehicle take to the street**, *IEEE Spectrum*, Vol. 35, No. 11, 1998.
- /10/ Hunt G. L.: **The great battery search**, *IEEE Spectrum*, Vol. 35, No. 11, 1998.
- /11/ Shimizu H., Harada J., Bland C., Kawakami K., Chan L.: **Advanced Concepts in Electric Vehicle Design**, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 44, No. 1, 1997.
- /12/ Chudi P., Malmquist A.: **A hybrid drive for the car of the future**, *ABB Review* 9/93, 1993.
- /13/ Radojković B. Ž.: **Električna vuča**, *Naučna knjiga*, Beograd 1990.
- /14/ **Electric Vehicle Power Systems (Motors and Controllers)**, *Web Site of the US Department of Energy, DOE Field Operations Program*, <http://ev.inel.gov/sop>
- /15/ **PowerPhase 100: EV/HEV Traction Drive or HEV starter Generator System**, *Unique Mobility Inc. Web Catalogue*, www.uqm.com, 1999.
- /16/ **Program Area Overview - Energy Efficiency and Renewable Energy**, *Web Site of the US Department of Energy, DOE Field Operations Program*, <http://www.eren.doe.gov>
- /17/ **PowerPhase System**, *Unique Mobility Inc. Web Catalogue*, www.uqm.com
- /18/ **Solectria AC-90 C & D**, *Solectria Corporation Web Catalogue*, www.solectria.com, 2000.
- /19/ **Alfa Romeo 166**, prospekt, *Motocommerce*, Banja Luka
- /20/ Lorenz R. D.: **Sensorless drive control methods for stable, high performance, zero speed operation**, *Proceedings of the 9th International Conference EPE – PEMC 2000*, Vol. 1 of 7, Košice, Slovak Republic

- /21/ **Fisher Electric Vehicle Technology**, *Fisher Vehicle Technology Web Site*, www.sensors.com
- /22/ Tesla N.: **Patenti iz oblasti elektroenergetike**, *Muzej Nikole Tesle*, Beograd 1988.
- /23/ Jevremović R., Radaković J., Oros Đ., Tepša J.: **Savremena rešenja električnih mašina za pogon električnih vozila**, *Zbornik izvoda sa II skupa: Trendovi razvoja električnih vozila*, Novi Sad, 1996.
- /24/ Jevremović R.: **Električne mašine – opšti deo o mašinama**, skripta, *Fakultet tehničkih nauka Novi Sad*, 1995.
- /25/ Vučković V.: **Električni pogoni**, *Elektrotehnički fakultet*, Beograd, 1997.
- /26/ Vukosavić S., Janda Ž., Matić L.: **Zbirka zadataka iz električne vuče**, *Univerzitet u Beogradu*, Beograd 1997.
- /27/ Soong W. L., Kliman G. B., Johnson R. N., White R. A., Miller J. E.: **Novel High-Speed Induction Motor for a Commercial Centrifugal Compressor**, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 36, No. 3, 2000.
- /28/ Toliyat H. M., Rahman K. M., Eshani M.: **Electric machines in electric and hybrid vehicle applications**, in *Proc. 1995 International Conference on Power Electronics*, Seoul, Korea, 1995.
- /29/ Toliyat H. M., Waikar S. P., Lipo T. A.: **Analysis and Simulation of Five-Phase Synchronous Reluctance Machines Including Third Harmonic of Airgap MMF**, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 34, No. 2, 1998.
- /30/ Kawamura A., Hoshi N., Kim T. W., Yokoyama T., Kume T.: **Analysis of Anti-Directional-Twin-Rotary Motor Drive Characteristics for Electric Vehicles**, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 44, No. 1, 1997.
- /31/ Gieras J. F., Gieras I. A.: **Electric motors – the future**, *Proceedings of the 9th International Conference EPE – PEMC 2000*, Vol. 1 of 7, Košice, Slovak Republic, 2000.
- /32/ Fitzgerald A. E., Kingsley C.: **Električne mašine za naizmeničnu i za jednosmernu struju**, *Naučna knjiga*, Beograd, 1962.
- /33/ Rahman M. F., Zhong L., Lim K. W.: **A Direct Torque-Controlled Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Incorporating Field Weakening**, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 34, No. 6, 1998.
- /34/ Pillay P., Bose B. K., Jahns T. M., Lorenz R. D., Slemon G. R., Strnat K.: **Performance and Design of Permanent Magnet AC Motor Drives**, Publication, *IEEE Industry Applications Society*, New York, USA, 1991.
- /35/ Petrović V.: **Uput u proračun asinhronog motora**, *Naučna knjiga*, Beograd, 1963.
- /36/ Cage T. B., **Living with an EV: 30000 miles in one year**, *EVS-13 Symposium Proceedings*, Osaka, Japan, 1996.
- /37/ Tasker J., **Motors for special applications**, *Drives and Controls Exhibition Conference*, 1998.
- /38/ Grochowalski J., **MMF of high phase order induction motors with different angles between stator windings and supply voltages**, *Proceedings of the 9th International Conference EPE – PEMC 2000*, Vol. 5 of 7, Košice, Slovak Republic, 2000.
- /39/ Kastner G., Pfaff G., Sack L., **Design and Performance of an Acceleration Drive with Permanent Magnets**, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 27, No. 5, 1991.

- /40/ Degner M. W., Maaren R. V., Fahim A., Nowotny D. W., Lorenz R. D., Syverson C. D., **A Rotor Lamination Design for Permanent Magnet Retention at High Speeds**, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 32, No. 2, 1996.
- /41/ Corley M. J., Lorenz R. D., **Rotor Position and Velocity Estimation for a Salient-Pole Permanent Magnet Synchronous Machine at Standstill and High Speed**, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 34, No. 4, 1998.
- /42/ Tian Yi, Ke-Wei Chen, Chi-Yong Lin, **An Attempt of Constructing a PM Synchronous Motor Drive Using Simple Chip TMS32020-Based Controller**, *Proc. of the International Conference on the Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines*, Part 2, Zurich, Switzerland, 1991.
- /43/ Simones M. G., Vieira P. Jr., **Model development and design of a wheel-motor drive system**, *Proceedings of the 9th International Conference EPE – PEMC 2000*, Vol. 5 of 7, Košice, Slovak Republic, 2000.
- /44/ Ferreira A. C., Williamson S., **Time-Stepping Finite Element Analysis of Brushless Doubly Fed Machine Taking Iron Loss and Saturation into Account**, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 35, No. 3, 1999.
- /45/ Lipo T. A., **Synchronous Reluctance Machines - A Viable Alternative for AC Drives?**, *Proc. of the International Conference on the Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines*, Part 2, Zurich, Switzerland, 1991.
- /46/ Cois A., Lamieri P., Marongiu I., **A Variable Reluctance Motor with Optimized Rotor Anisotropy**, *Proc. of the International Conference on the Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines*, Part 2, Zurich, Switzerland, 1991.
- /47/ Verma S. P., **Design and Performance of Special Reluctance Motors With Regard to Torques, Vibrations and Noise**, *Proc. of the International Conference on the Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines*, Part 2, Zurich, Switzerland, 1991.
- /48/ Zaim M. E., Tahi S., Laporte B., **Calculation and Performances of Smooth Stator Reluctance Machines**, *Proc. of the International Conference on the Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines*, Part 2, Zurich, Switzerland, 1991.
- /49/ Hofmann H., Sanders S. R., **High-Speed Synchronous Reluctance Machine with Minimized Rotor Losses**, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 36, No. 2, 2000.
- /50/ Vagati A., Pastorelli M., Franceschini G., Petrache S. C., **Design of a Low-Torque-Ripple Synchronous Reluctance Motors**, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 34, No. 4, 1998.
- /51/ Vagati A., Pastorelli M., Franceschini G., Dragoreanu V., **Flux-Observer-Based High-Performance Control of Synchronous Reluctance Motors by Including Cross Saturation**, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 35, No. 3, 1999.
- /52/ Consoli A., Russo F., Scarcella G., Testa A., **Low- and Zero-Speed Sensorless Control of Synchronous Reluctance Motors**, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 35, No. 5, 1999.
- /53/ Jung-Ik Hu, Seog -Joo Kang, Seung-Ki Sul, **Position-Controlled Synchronous Reluctance motor Without Rotational Transducer**, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 35, No. 6, 1999.
- /54/ Lubin T., Weinachter F., Razik H., Rezzoug A., **Modelling and Identification of a Synchronous Reluctance Machine with a Squirrel Cage**, *Proceedings of the 9th International Conference EPE – PEMC 2000*, Vol. 5 of 7, Košice, Slovak Republic, 2000.

- /55/ Kwon Y. A., Reichert K., **Choppingless Operation of a Nonlinear Switched Reluctance Motor**, *Proc. of the International Conference on the Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines*, Part 2, Zurich, Switzerland, 1991.
- /56/ Finch J. W., Metwally H. M. B., Faiz J., **Brushless drives using multy-tooth per pole switched reluctance motors: a CAD method**, *Proc. of the International Conference on the Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines*, Part 2, Zurich, Switzerland, 1991.
- /57/ Chai J., Yao R., Chen P., **Principles for Switched Reluctance Motor Design**, *Proc. of the International Conference on the Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines*, Part 2, Zurich, Switzerland, 1991.
- /58/ Jufer M., Crivii M., Hatefi K., **Switched Synchronous Motor**, *Proc. of the International Conference on the Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines*, Part 2, Zurich, Switzerland, 1991.
- /59/ Rahman K. M., Fahimi B., Suresh G., Rajarathnam A. V., Ehsani M., **Advantages of Switched Reluctance Motor Applications to EV and HEV: Design and Control Issues**, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 36, No. 1, 2000.
- /60/ Murai Y., Cheng J., Yoshida M., **New Soft-Switched/Switched-Reluctance Motor Drive Circuit**, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 35, No. 1, 1999.
- /61/ Kjaer P. C., Gallegos-Lopez G., **Single-Sensor Current Regulation in Switched Reluctance Motor Drives**, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 34, No. 3, 1998.
- /62/ Nagel N. J., Lorenz R. D., **Rotating Vector Methods for Smooth Torque Control of a Switched Reluctance Motor Drive**, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 36, No. 2, 2000.
- /63/ Inderka R. B., De Doncker R. W., **Simple Average Torque Estimation for Control of Switched Reluctance Machines**, *Proceedings of the 9th International Conference EPE – PEMC 2000*, Vol. 5 of 7, Košice, Slovak Republic, 2000.
- /64/ Piskač L., **Simulation of the Switched Reluctance Motor Speed Control**, *Proceedings of the 9th International Conference EPE – PEMC 2000*, Vol. 5 of 7, Košice, Slovak Republic, 2000.
- /65/ Vučković V., **Opšta teorija električnih mašina**, Nauka, Beograd, 1992.
- /66/ Rahman M. A., Quin R., **A Permanent Magnet Hysteresis Hybrid Synchronous Motor for Electric Vehicles**, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 44, No. 1, 1997.
- /67/ Chalmers B. J., Musaba L., **Design and Field-Weakening Performance of a Synchronous Reluctance Motor With Axially Laminated Rotor**, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 34, No. 5, 1998.
- /68/ Toba A., Lipo T. A., **Generic Torque-Maximizing Design Methodology of Surface Permanent-Magnet Vernier Machine**, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 36, No. 6, 2000.
- /69/ Terashima M., Ashikaga T., Mizuno T., Natori K., Fujiwara N., Yada M., **Novel Motors and Controllers for High-Performance Electric Vehicle with Four In-Wheel Motors**, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 44, No. 1, 1997.
- /70/ Henneberger G., Viorel I. A., Blissenbach R., **Single-Sided Transverse Flux Motors**, *Proceedings of the 9th International Conference EPE – PEMC 2000*, Vol. 1 of 7, Košice, Slovak Republic, 2000.

- /71/ Profumo F., Zhang Z., Tenconi A., **Axial Flux Machines Drives: A New Viable Solution for Electric Cars**, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 44, No. 1, 1997.
- /72/ Ramsden V. S., Mecrow B. C., Lovatt H. C., **Design of an In-Wheel Motor for a Solar-Powered Electric Vehicle**, *Proceedings of IEE EMD '97 Conference*, 1997.
- /73/ Muljadi E., Butterfield C. P., Win Y., **Axial-Flux Modular Permanent-Magnet Generator with a Toroidal Winding for Wind-Turbine Applications**, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 35, No. 4, 1999.
- /74/ Caricchi F., Crescimbeni F., Honorati O., Bianco G. L. Santini E., **Performance of Coreless-Winding Axial-Flux Permanent-Magnet Generator With Power Output at 400 Hz, 3000 r/min**, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 34, No. 6, 1998.
- /75/ Radun A. V., Ferreira C. A., Richter E., **Two-Chanel Switched Reluctance starter/Generator Results**, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 34, No. 5, 1998.
- /76/ Nedic V., Lipo T. A., **Experimental Verification of Induced Voltage Self-Excitation of a Switched Reluctance Generator**, *IEEE Industry Application Society Annual Meeting*, Rome, Italy, 2000.
- /77/ Chudi P., Malmquist A., **Hybrid Drive for Low-Emission Trucks and Buses**, *ABB Review* 6/7, 1996.
- /78/ Jack A., Mecrow B., Weiner C., **Switched Reluctance and Permanent Magnet Motors Suitable for Vehicle Drives - a Comparison**, *The Institution of Electrical Engineers*, 2000.
- /79/ Varga M., **Prvi elektromobil registrovan u SRJ - rezime posle tri godine eksploatacije**, *Zbornik izvoda sa II skupa: Trendovi razvoja električnih vozila*, Novi Sad, 1996.
- /80/ Sakai S., Hori Y., **Advantage of Electric Motor for Anti Skid Control of Electric Vehicle**, *Proceedings of the 9th International Conference EPE – PEMC 2000*, Vol. 7 of 7, Košice, Slovak Republic, 2000.
- /81/ Riezenman M. J., Jones W. D., **New York wants more hybrid buses on the city's streets**, *IEEE Spectrum*, Vol. 37, No. 9, 2001.
- /82/ ---- **Hybrid Vehicles are Worth It!**, *IEEE Spectrum*, Vol. 38, No. 5, 2001.
- /83/ Lave L. B., MacLean H. L., **Are Hybrid Vehicles Worth It?**, *IEEE Spectrum*, Vol. 38, No. 3, 2001.
- /84/ Lee Hyeoung-Dong, Koo Euh-Suh, Sul Seung-Ki, Kim Joohn-Sheok, **Torque Control Strategy for a Parallel-Hybrid Vehicle Using Fuzzy Logic**, *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 6, No. 6, 2000.
- /85/ Lee Hyeoung-Dong, Sul Seung-Ki, Cho Han-Sang, Lee Jang-Moo, **Advanced Gear-Shifting and Clutching Strategy for a Parallel-Hybrid Vehicle**, *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 6, No. 6, 2000.
- /86/ Hill J. R., **DC and AC traction motors**, *Course Notes of 6th Residential Course on Electric Traction Systems*, Institution of Electrical Engineers, London, 2001.
- /87/ Moore B., **Tomorrow's Mobile Power Plants**, *evWorld Web Newspapers*, March 2001.